


智能机器人先进技术丛书

 Springer

仿生自组织 机器人系统

Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems

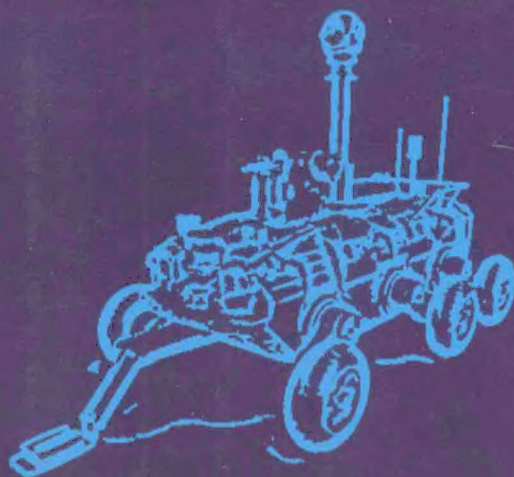
[美]孟 艳 (Meng Yan)

主编

[德]金耀初 (Jin Yaochu)

杨文明

译



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

智能机器人先进技术丛书

 Springer

仿生自组织 机器人系统

Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems

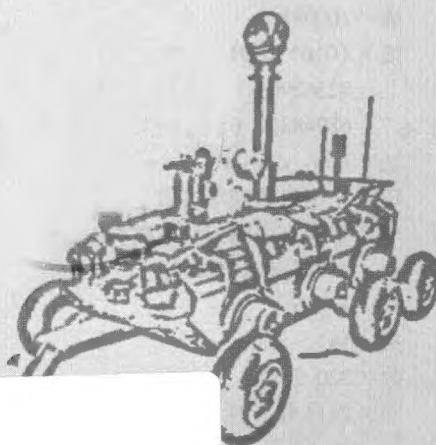
[美]孟 艳 (Meng Yan)

主编

[德]金耀初 (Jin Yaochu)

杨文明

译



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

仿生自组织机器人系统/ (美) 孟艳, (德) 金耀初主编; 杨文明译. —北京: 北京理工大学出版社, 2014. 5

书名原文: Bio-inspired self-organizing robotic systems

ISBN 978 - 7 - 5640 - 8970 - 2

I. ①仿… II. ①孟… ②金… ③杨… III. ①仿生机器人 - 自组织系统
IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 053228 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 - 2013 - 3743 号

Translation from the English language edition:

Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems

by Yan Meng and Yaochu Jin (eds.)

Copyright© 2011 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 17.75

彩 插 / 14

字 数 / 320 千字

版 次 / 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 88.00 元

责任编辑 / 刘 娟

文案编辑 / 刘 娟

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



前言

在各种不同的不断变化、不可预测且未知的环境中，越来越需要使用机器人系统来完成多种复杂的任务，鉴于这些挑战，人们提出了自组织群机器人和自重构模块化机器人。例如，大规模群机器人系统的新型集体行为在面对环境变化时能够表现出高度的柔性和适应性；自重构模块化机器人能够自动改变系统的外形以适应复杂的地面状况。现在，为了面对更加复杂且苛刻的环境条件以及满足这些环境中的任务需求，机器人的认知能力和结构设计的发展同样变得越来越重要。与传统的预编程技术相比，自组织机器人系统在不断变化的、未知环境的应用中，尤其是在稳健性、自修复和自适应方面更具前景。为了具备上述特性，自组织机器人系统必须以分布式方式控制，理想的方式是单个简单机器人间的局部相互作用，而不是外部的全局控制。然而，分布式自组织机器人系统的设计仍然是机器人技术中最具挑战性的问题之一。

从宏观群居昆虫中的群系统到微观的细胞系统，生物系统能够在多种不确定性存在时通过相对简单的局部相互作用来产生稳健且复杂的新型全局行为。将由生物系统那里借用而来的思想用于开发自组织机器人系统，已经变得越来越普遍，而且在最近几年里取得了相当大的成功。例如，受到在群居昆虫群落和鸟群中所观察到的行为的启发，群体智能已经成为解决具有大量平行系统的复杂系统的新型范式。生物中另一个自组织过程是多细胞生物的形态形成，用来处理自组织机器人系统的基于胚胎发育计算模型的形态学方法已经表现出其潜在的价值，这种机器人系统也被称为形态机器人。

本书收集了关于仿生自组织机器人系统的最具代表性的研究工作。它由四个部分组成，第一部分讨论处理群机器人系统的仿生自组织方法，比如模仿多细胞生物中生物形态形成的形态学方法、模仿群居昆虫（比如鸟类、蜜蜂等）行为的群体智能方法、用于机器人机体的基于激素的方法，以及用于群机器人的基于沟通机制的遗传激励。我们在第一部分第一章中介绍了一种在机器人发展中最新出现的研究领域——形态机器人。形态机



机器人学的主要内容是应用发展的原理来设计自组织机器人系统的形态和控制器，这一章中总结了形态机器人学的主要主题，讨论了形态机器人学至进化机器人学与后继的机器人学之间的关系，展望了进化发展的机器人学，它是进化与发展机器人学的天然组合。

第一部分第二章由 Schmickl 撰写，该章中第一次提出了使用控制器的多种群机器人系统，这一控制器是模仿蜜蜂的群体行为和黏液凝聚的模型；然后讨论了多模式机器人机体的基于激素的控制模式，而且所有的这些都是分布式的自组织系统。在第一部分第三章中，La 和 Sheng 针对处于喧嚣和嘈杂环境中的多机器人的目标跟踪——它们是模仿自然界中观察到的鸟类、蜜蜂和鱼类等的集群行为的——提出了两种集群控制算法，即 Mult-CoM-Shrink 和 Mult-CoM-Cohesion，理论上研究了这两种算法的稳定性和可扩展性。模仿蚁群系统中基于信息素的激励行为，Brandoff 和 Sayama 在第一部分第四章中描述了一种群系统中机器人间接通信的人工遗传激励，这里的群机器人执行的是未知环境中的测绘任务。在第一部分的最后一章中，生物学家 Garnier 分享了如何从群机器人模仿动物世界中的生物自组织行为中受益，并反过来推动对动物集体行为的研究。

第二部分介绍了自重构模块化机器人的几种仿生方法。Kernbach 等人在第二部分第六章中提出了异构模块化机器人自组装的基于约束的自优化方法，这种方法主要是模仿分子生物中观察到的基因调控网络，而且该方法中还考虑了机械和混合约束。在第二部分第七章中，Meng 和 Jin 模仿多细胞生物的胚胎发育，提出了两种模块化机器人（即 Cross-Cube 和 Cross-Ball）自重构的分层的构型形成方法，这种分层结构由三层组成，其中基于虚拟单元的第 1 层控制器负责根据环境限制为机器人自动产生合适的目标构型，基于基因调控网络的第 2 层控制器为各模块提供自重构方案，基于骨架的第 3 层控制器在各模块的机械性约束和连通性约束下导引各模块向目标构型移动。通过使用这种分层的构型形成框架，机器人的目标样式能够自动形成以适应不断变化的环境。在第二部分第八章中，Miyashita 等人首先讨论了用于制造 3D 微型产品的自组装机器人中的三种基本研究问题，即组装问题、动态问题和相互作用问题。然后通过一个含有有源模块（由振动电动机激励）和无源模块（由永久磁铁激励）的研究案例，说明了分布式方式中模块的分异行为。本章中还对控制宏观自组装系统的熵进行了分析。

第一和第二部分集中讨论了群机器人和模块化机器人的自组织行为，而第三部分则将机器人系统的自主智力开发作为焦点。在第三部分第九章

中, Weng 基于进化网络 (DN) 提出了机器人系统控制中枢的通用模型, 基于生物染色体均等分配原则提出了一种以细胞为中心的现场学习方法来处理所有层次的智力开发和运行, 这种方法是从五种基本的智力难题中自动建立的, 它们是开发、构造、领域、空间和时间。本章的焦点是对这种模型如何处理时间先后关系进行分析。

本书的第四部分给出了自组织机器人系统的两种特定应用。Jones 等人 在第四部分第十章中模仿生物体中的黏液菌, 提出了类多头绒泡菌的机器人 (其中的多头绒泡菌可看作一种智能计算材料), 为多头绒泡菌机器人提出了一种基于粒子的计算模型, 这种机器人能够以一种分布式方式从简单的局部相互作用中自发产生复杂的振荡模式。作者希望多头绒泡菌机器人可用于未来机器人器件智能材料的物理实例。在本书的最后一章——第十一章中, Hoffmann 等人提出了一种分层结构来为工业机器人建立自组织机器人单元, 他们在所提出的系统中使用了一种基于有机计算的模型, 将系统出现和自组织特性结合在一起。

我们相信, 本书在仿生自组织机器人系统方面将为读者提供最新且全面的见解。希望本书能够在多学科研究领域之间建立起桥梁, 比如机器人、人工生命、认知科学、系统生物学、发育生物学和进化计算等, 从而启发研究者和工程师们产生更多创造性的想法, 来进一步推动这一新兴且令人兴奋的领域的发展。

我们衷心感谢为本书贡献了优秀章节的所有撰稿人, 我们还要感谢本系列丛书的主编 Janusz Kacprzyk 教授和 Springer 出版社的 Thomas Ditzinger 为我们提供了编写本书的机会。

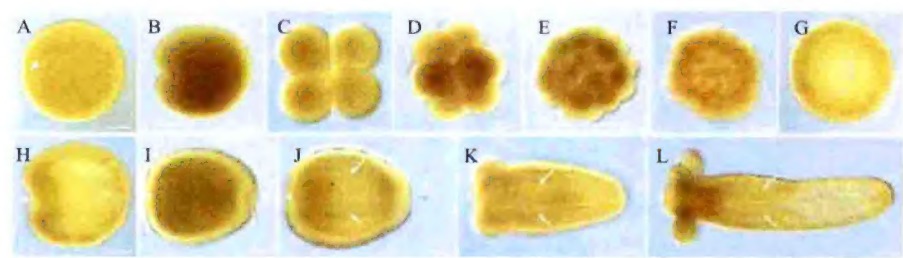
孟艳 (Meng Yan)

斯蒂文斯理工学院电子和计算机工程系, 美国, 霍博肯, NJ 07030

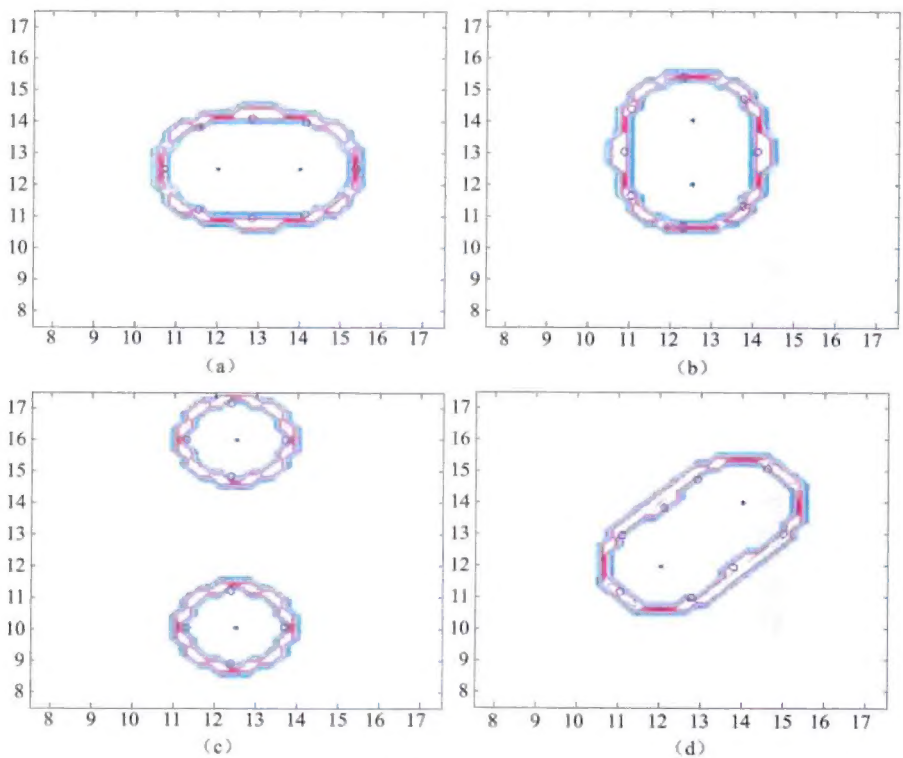
金耀初 (Jin Yaochu)

萨里大学计算机系, 英国, 吉尔福德, GU2 7XH

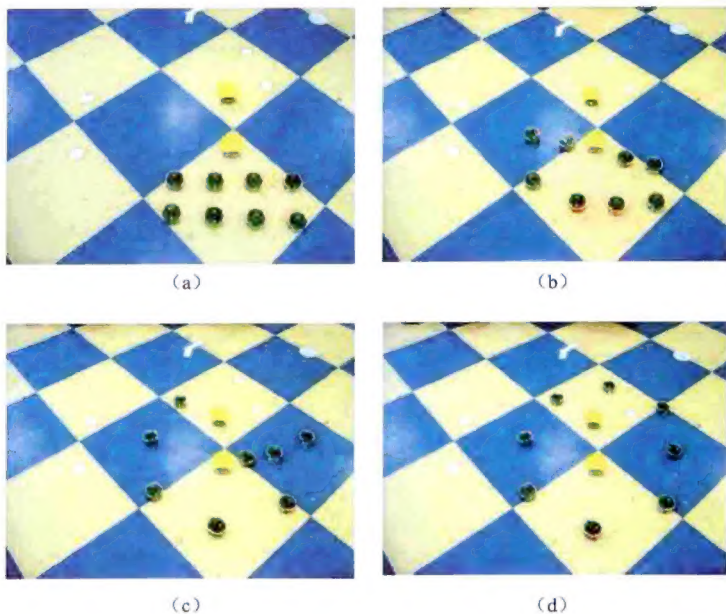
★ 第一部分第一章 形态机器人学——机器人系统形态和神经的一种进化发展的自组织方法



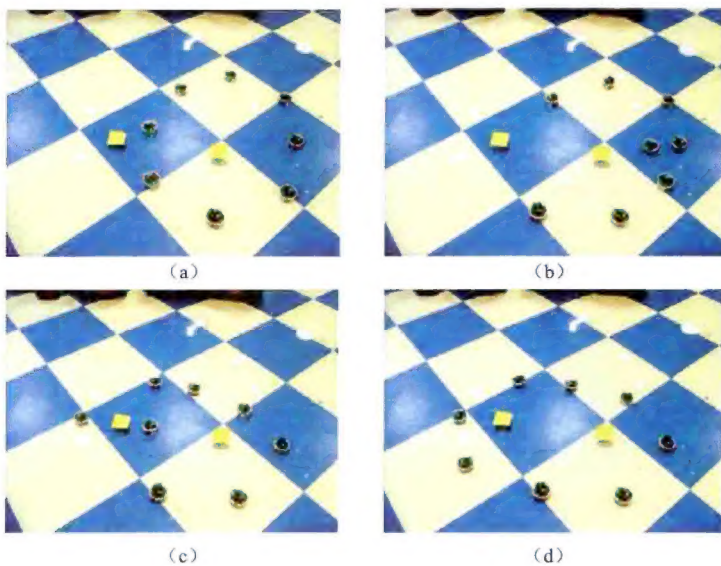
彩图 1 海葵的变形。发育阶段为：卵（A），桑葚胚（B~F），囊胚（G），原肠胚（H），幼体（I、J），息肉（K、L）。摘自文献 [27]（参见内文 p. 5）



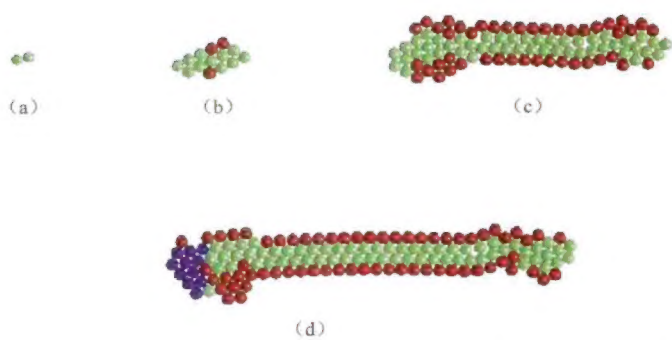
彩图 6 图（a）~图（d）是表示需要诱捕的目标移动时适应性形态形成的仿真结果快照（参见内文 p. 12）



彩图7 图 (a) ~ 图 (d) 两个目标(用一张纸覆盖的)被其他八个由 H-GRN 模型组织机器人诱捕的实验结果快照 (参见内文 p. 12)

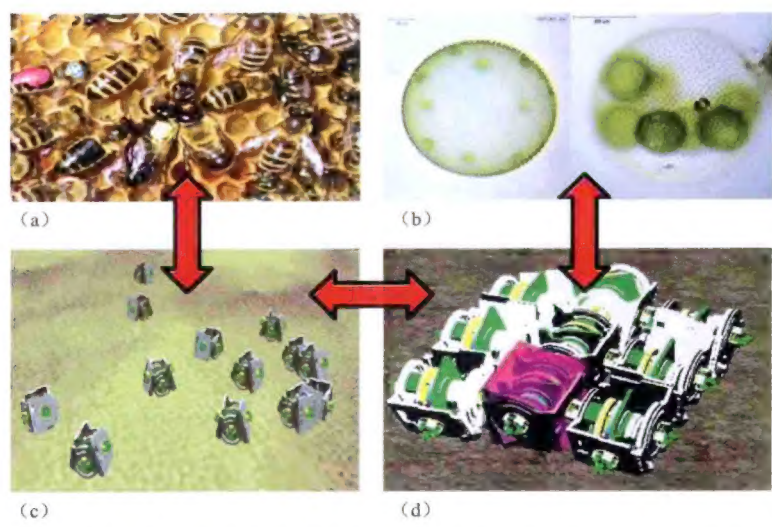


彩图8 图 (a) ~ 图 (d) 中, 目标形状的适应性和形状的再形成以保持对目标的诱捕 (参见内文 p. 13)

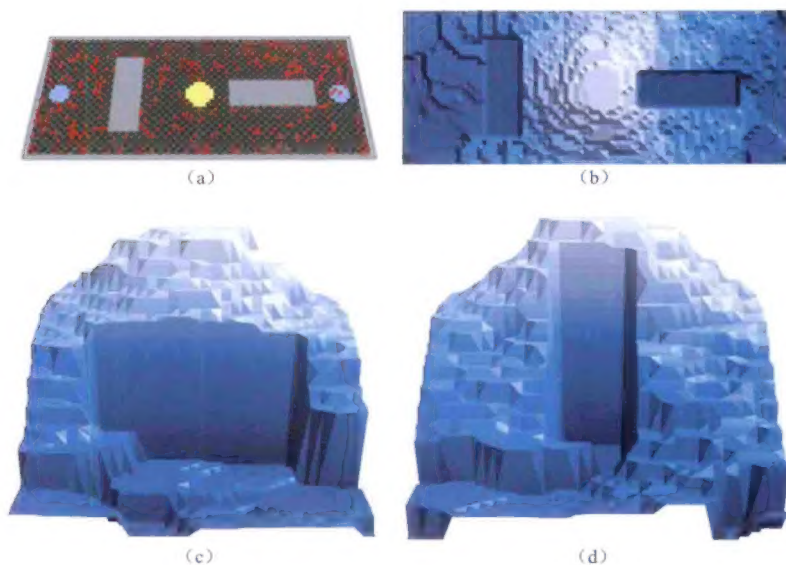


彩图 10 图 (a) ~ 图 (d) 为文献 [48] 中给出的在 GRN 模型控制下的自稳定细胞生长 (参见内文 p. 16)

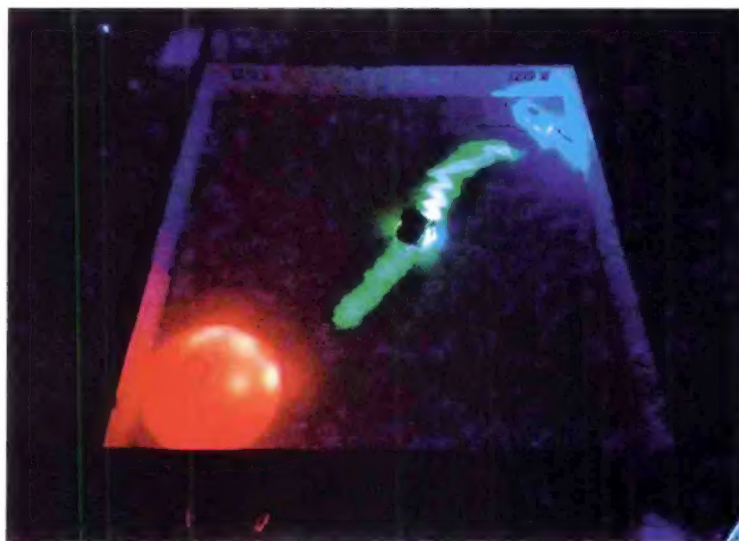
★ 第一部分第二章 如何设计机器人机体和机器人群? ——具身自组织系统中的仿生、拟生和人工进化



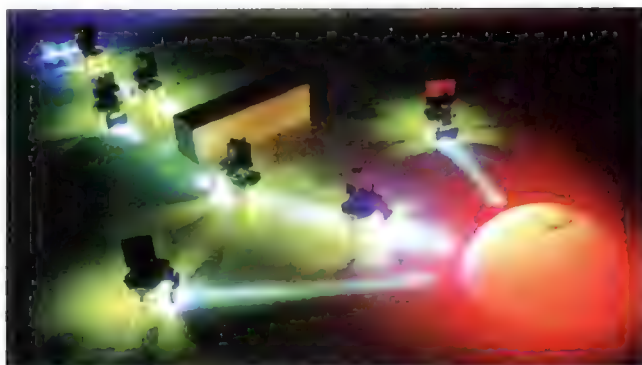
彩图 1 群机器人和多细胞机器人体的灵感源。箭头表示一个领域中的知识如何潜在地影响另一个领域中的研究。图 (b) 中的“团藻”由 Ralf Wagner 博士提供, 来自“维基共享资源库”(参见内文 p. 25)



彩图 3 使用交哺行为启发算法的机器人群的仿真。图 (a) 是清洁场景中花蜜设置的截图：机器人（红色）试图发现两尘粒区（蓝色）到中心卸载区（黄色）的最短路径。路径被两个壁面（灰色）阻碍。图 (b) 是指向卸载区的梯度的俯视图。图 (c) 是从左侧观察的相同梯度的侧视图。图 (d) 是从右侧观察的相同梯度的侧视图。图片来源于文献 [30]（参见内文 p. 31）



彩图 8 机器人在 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的场地中、食物源（右上方）和出发点（左下方）间 1.3 m 的距离上铺设的路径。图中的机器人正在从食物源指向出发点的返回路上，而且它遵循其自身的路线（参见内文 p. 38）



彩图 10 未来的工作中如何使用闪光的地板和传感器的设计照片。两个机器人正离开出发点寻找食物，其他的机器人正被导引至障碍物周围的出发点（参见内文 p. 39）

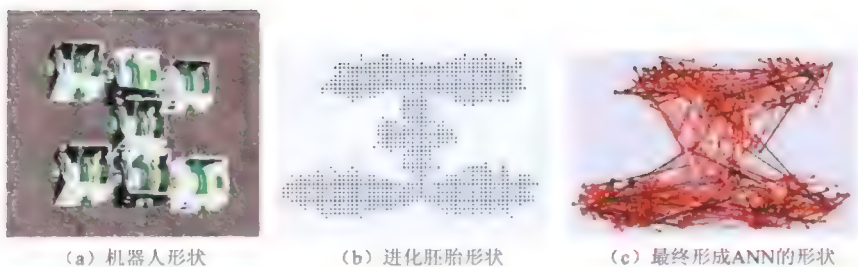


(a) 3个模块

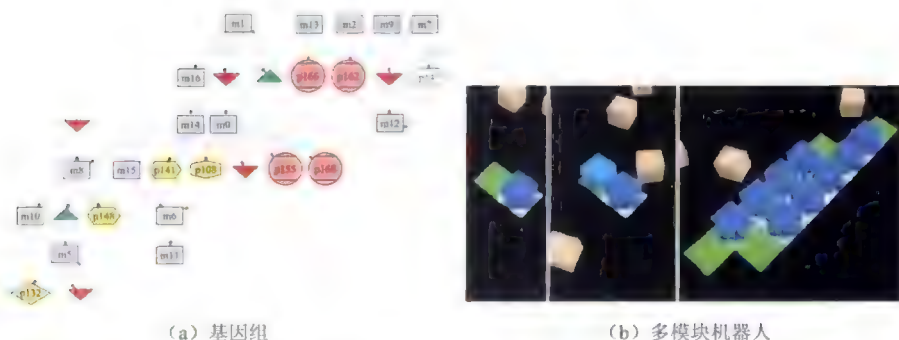


(b) 5个模块

彩图 11 模块化机器人中“步态学习”的标准程序场景实例。其中图 (a) 为 3 个模块，图 (b) 为 5 个模块。在图 (a) 和图 (b) 的两种构造中，AHHS 在几十代内进化并有效地移动机器人（参见内文 p. 41 – p. 42）

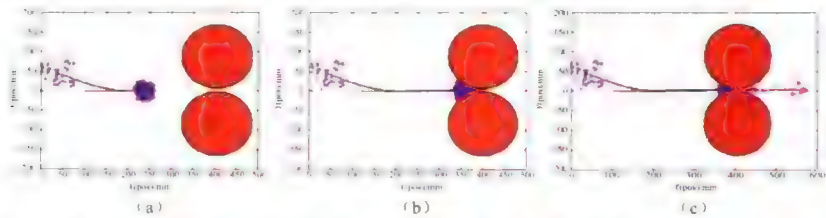


彩图 14 结构化 ANN 的进化。图 (a) 为给定的机器人形状，它是人工进化过程适应度函数的一部分。图 (b) 是虚拟胚胎的进化形状，它们组成了 ANN 网络拓扑。图 (c) 是一种 ANN 拓扑的例子，它由该胚胎生长而来（参见内文 p. 44）

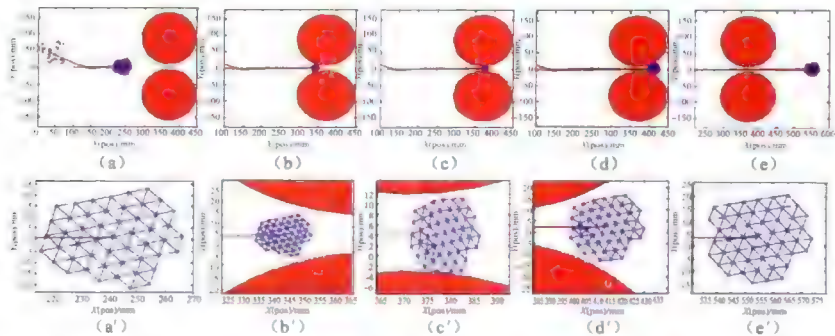


彩图 15 图 (a) 控制图 14b 中胚胎生长过程的进化基因组结构。基因组中的每一个基因都能够产生蛋白质，这些蛋白质反过来能够活化其他基因来产生形成素，改变细胞对形成素的接受能力，或者与其他细胞间建立神经连接。其中基因和蛋白质用几何形状来表示，蛋白质和基因之间的相互作用用箭头表示。图 (b) 在模拟环境中使用虚拟胚胎的多模块机器人成形。与上面提到的 VE 相比，细胞的复制过程通过连接机器人模块和机器人机体来实现。蓝色盒子表示已经连接的机器人模块，它们是多细胞机器人机体的一部分，绿色块表示一个“自由度”机器人模块能够连接到机器人机体的位置。左侧子图：过程的开始，机器人机体只由单个模块组成，它正在等待另一个模块进行连接；中间子图：连接了一个机器人模块，现在机器人机体由 2 个模块组成；右侧子图：机体成形进行中，多个模块已经连接在了一起（参见内文 p. 44）

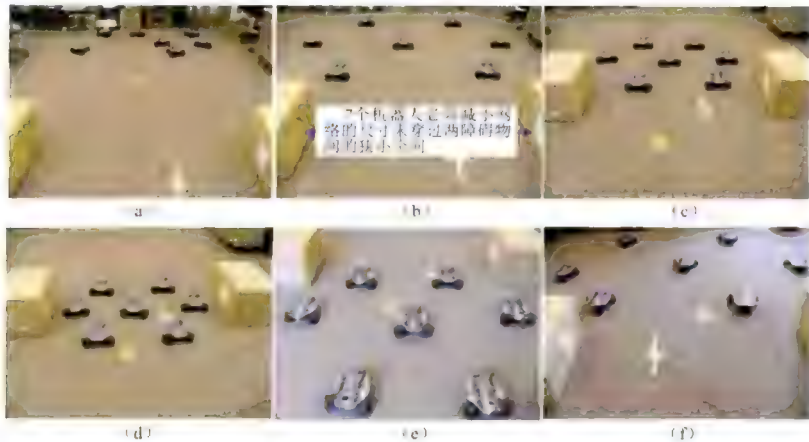
★ 第一部分第三章 喧嚣和嘈杂环境中的多体集群控制算法



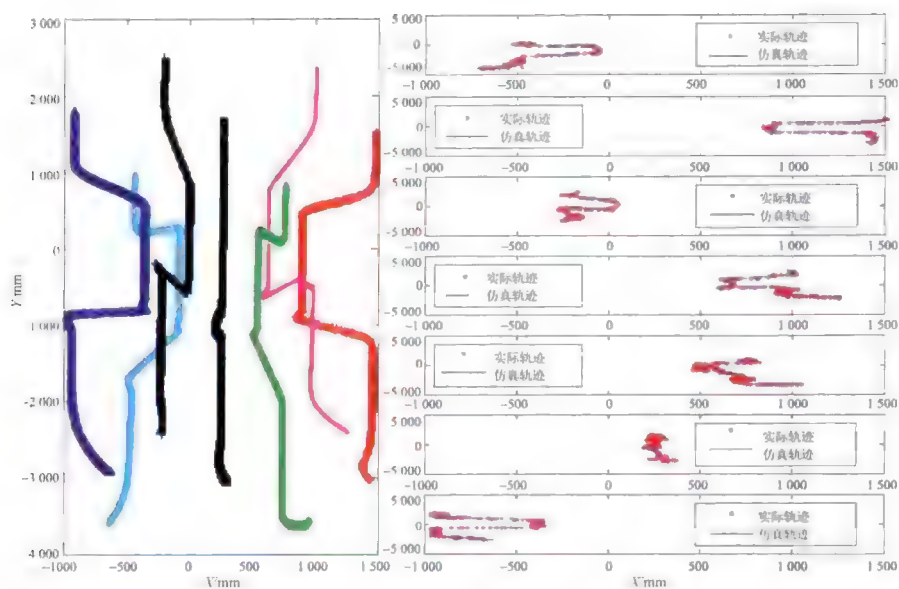
彩图 5 移动机体网络的快照图。图 (a) 为移动机体形成网络时；图 (b) 为移动机体避开障碍物时；图 (c) 为移动机体在两障碍物间的狭小空间内阻塞。这些结果在使用算法 (22) 后得到 (参见内文 p. 72)



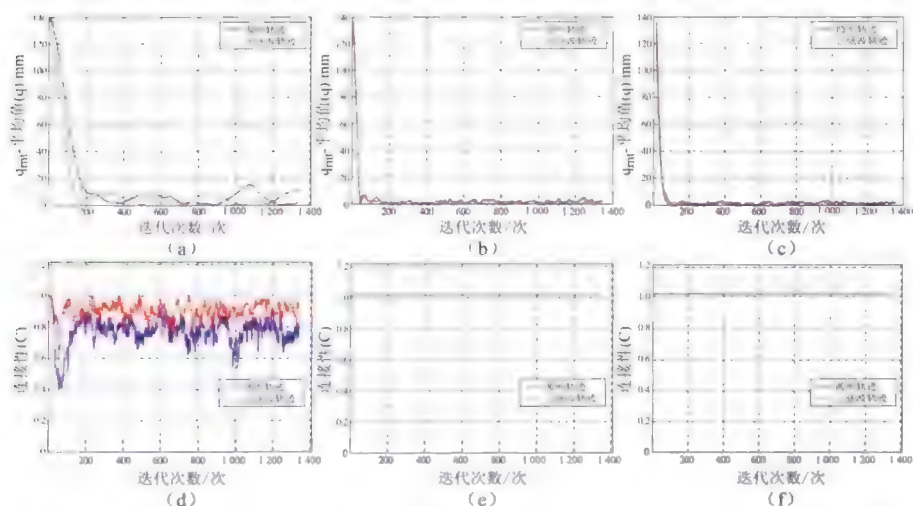
彩图 6 移动机体网络的快照图。图 (a) 为移动机体形成网络时；图 (b)、图 (c) 为移动机体网络减缩以避开障碍物；图 (d) 为移动机体成功穿过两障碍物间的狭窄空间；图 (e) 为移动机体恢复至其原来的尺寸。图 (a') ~ 图 (e') 分别为图 (a) ~ 图 (e) 的放大图。这些结果经使用我们的集群控制算法 (34) 得到 (参见内文 p. 73)



彩图 8 使用我们的适应性集群控制算法 (34) 时 7 个 Rovio 机器人适应性集群控制的快照图。图 (a) 中, 7 个机器人随机分布; 图 (b) 中, 7 个机器人形成点阵队形; 图 (c) 中, 7 个机器人开始减缩其网络的尺寸; 图 (d) 中, 7 个机器人穿过两个障碍物间的狭窄空间; 图 (e) 中, 7 个机器人开始恢复其网络的尺寸; 图 (f) 中, 7 个机器人完全恢复了其网络尺寸 (参见内文 p. 74)

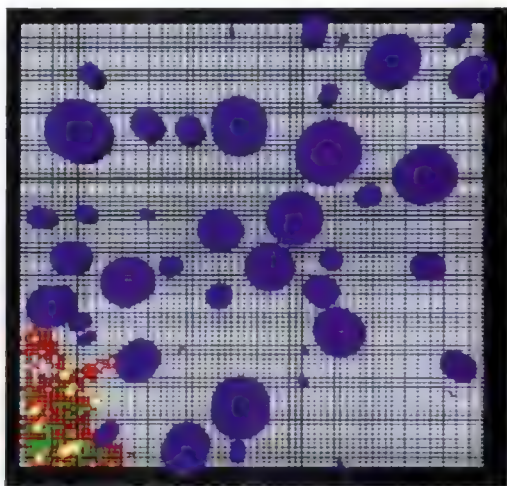


彩图 9 使用适应性集群控制算法 (34) 得到的 7 个机器人的轨迹 (参见内文 p. 74)



彩图 12 追踪性能结果 (CoM 与目标位置间的误差): 图 (a) 为算法 (22) 的结果; 图 (b) 为多 CoM 减缩算法的结果; 图 (c) 为多 CoM 聚集算法的结果 连接性由 $C(t)$ 进行评估; 图 (d) 为算法 (22) 的评估结果; 图 (e) 为多 CoM 减缩算法的评估结果; 图 (f) 为多 CoM 聚集算法的评估结果 (参见内文 p. 78)

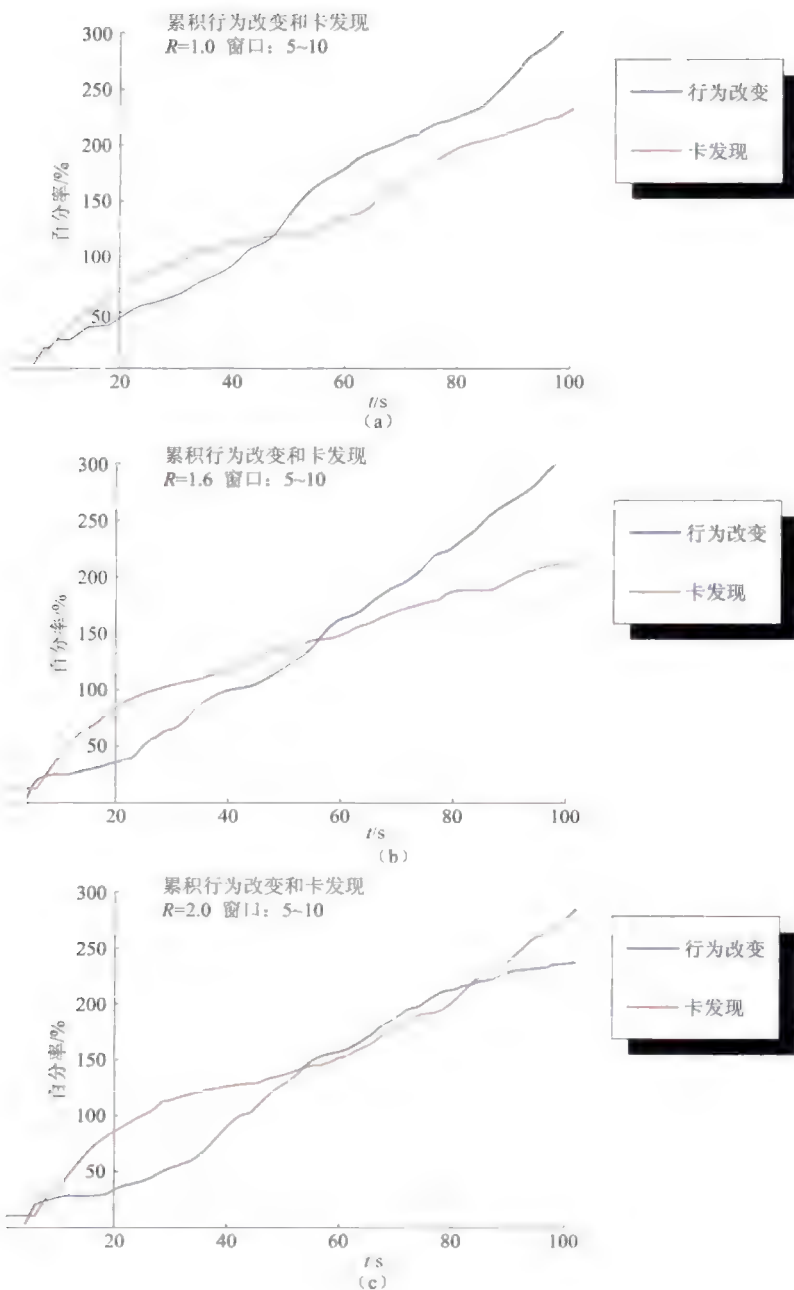
★ 第一部分第四章 遗传激励



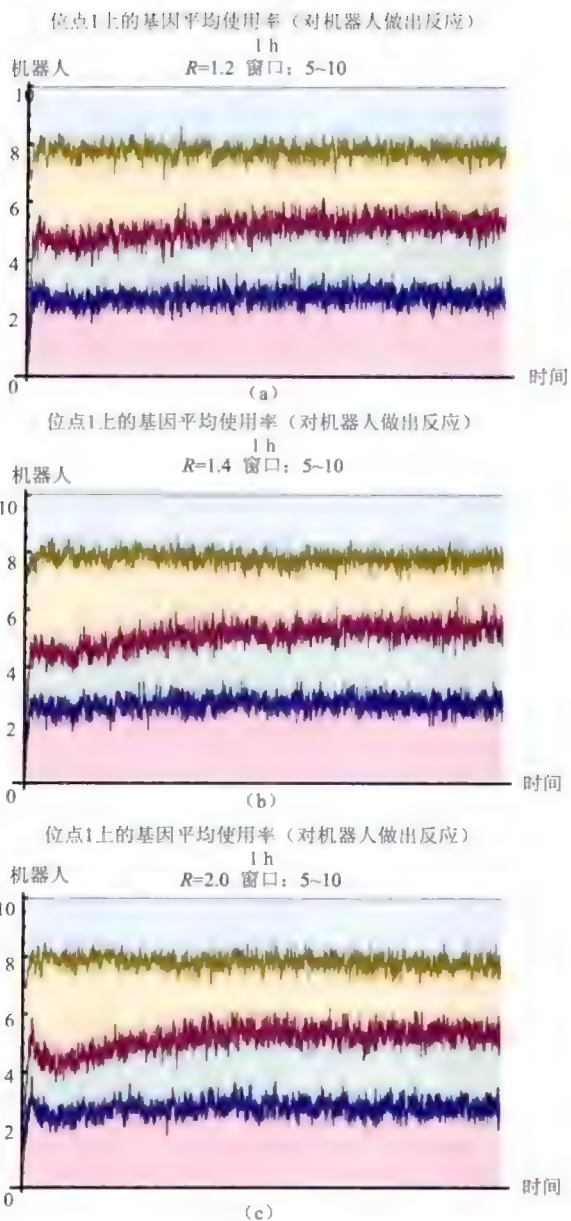
彩图3 十个群机器人（黄色）搜索随机产生的虚拟环境的“鸟瞰图”。环境中具有嵌入地板上的稠密 RFID 卡点阵。蓝色圆柱为障碍物，RFID 卡根据它们的当前状态改变颜色（参见内文 p. 89）



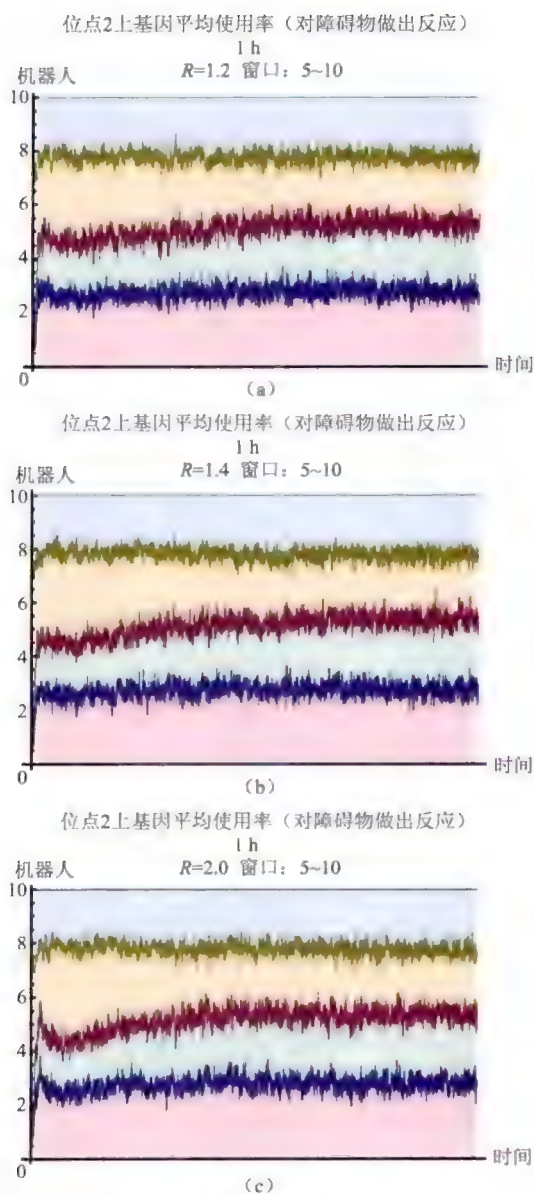
彩图4 R 值为 0.2 m（图（a））和 2 m（图（b））的环境实例。具有较小 R 值的环境中导航复杂性较大，而具有较大 R 值的环境中复杂性较小（参见内文 p. 90）



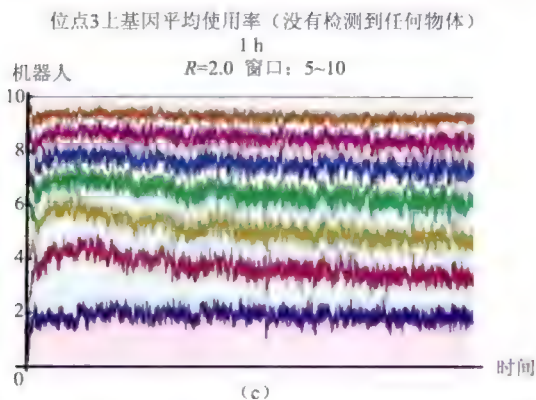
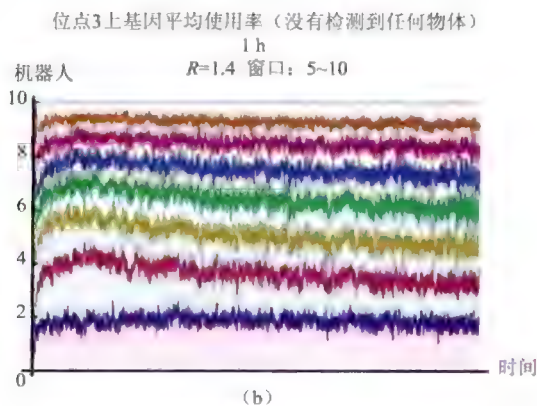
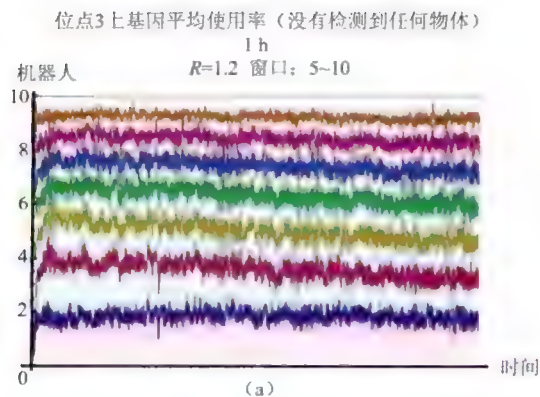
彩图 8 在 100 s 内机器人行为的累积变化数和机器人发现卡的累计数的时间序列曲线。其中可访问窗口为 5 ~ 10, $R = 1.0$ m (见图 (a)), 1.6 m (见图 (b)), 1.0 m (见图 (c))。在不同时间尺度上可观察到明显的累积停止时期, 在该时期内卡发现速率或行为改变速率明显减慢 (参见内文 p. 94)



彩图9 整个仿真过程中（1 h）位点1（控制机器人对其他机器人作出反应）上所有机器人的基因平均使用率。选择 R 值分别为 1.2, 1.4 和 2.0, 且可访问窗口为 5 ~ 10。与四种不同可能的等位基因对应的颜色分别为：红色表示“旋转向前”，绿色表示“旋转远离”，橘色表示“返回”，蓝色表示“随机选择”（参见内文 p. 95）



彩图 10 整个仿真过程中（1 h）位点 2（控制机器人对静态障碍物做出反应）上所有机器人的基因平均使用率。选择 R 值分别为 1.2、1.4 和 2.0，且可访问窗口为 5~10。与四种不同可能的等位基因对应的颜色分别为：红色表示“旋转向前”，绿色表示“旋转远离”，橘色表示“返回”，蓝色表示“随机选择”（参见内文 p. 96）



彩图 11 整个仿真过程中（1 h）位点 3（当没有检测到任何障碍物/机器人时控制机器人运动）上所有机器人的基因平均使用率。选择 R 值分别为 1.2、1.4 和 2.0，且可访问窗口为 5~10。与 8 种不同可能的等位基因对应的颜色分别为：红色表示“向前移动”，绿色表示“向后移动”，蓝色表示“向前移动两次并向左旋转”，青色表示“向前移动两次并向右旋转”，黄色表示“向后移动两次并向左旋转”，橘色表示“向后移动两次并向右旋转”，粉红色表示“随机旋转或向前移动”，紫色表示“随机旋转或向后移动”（从下往上看）（参见内文 p. 97）

★ 第一部分第五章 从蚁群到机器人和从机器人到蚁群：机器人如何促进对动物集体行为的研究



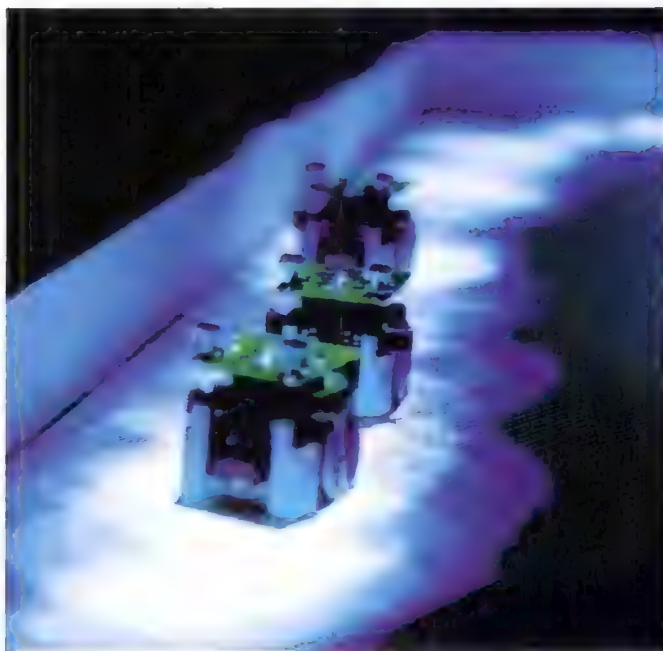
彩图1 机器人群可实现的群体行为的例子。图(a)为物体的聚集^[5]；图(b)为物体的分类^[58]；图(c)是机器人的分散^[71]；图(d)是对环境的协同探索^[18]；图(e)是目标定位^[47]；图(f)为物体的协同运输^[15]（参见内文 p. 104）



彩图2 动物（这里使用美洲大蠊蟑螂）与机器人（这里使用 Insbots）混合实验的例子。引自文献 [46]（参见内文 p. 107）

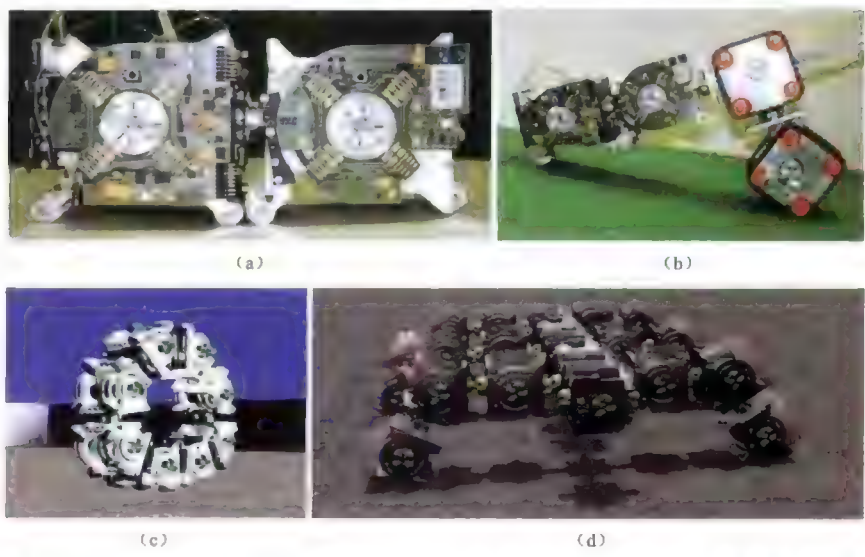


彩图 3 Swistrack^[19]得到的多功能跟踪软件。它能够跟踪实验中的动物和机器人。来自 <http://disal.epfl.ch/research/current/leurre/movies/collectivedecision.avi> (参见内文 p. 108)



彩图 5 机器人 Alice^[17]追寻光踪迹。引自文献 [41] (参见内文 p. 111)

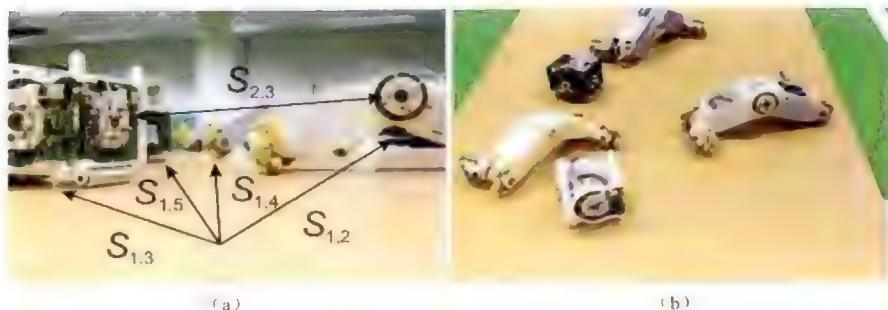
★ 第二部分第六章 异构多机器人组织的自优化自组装



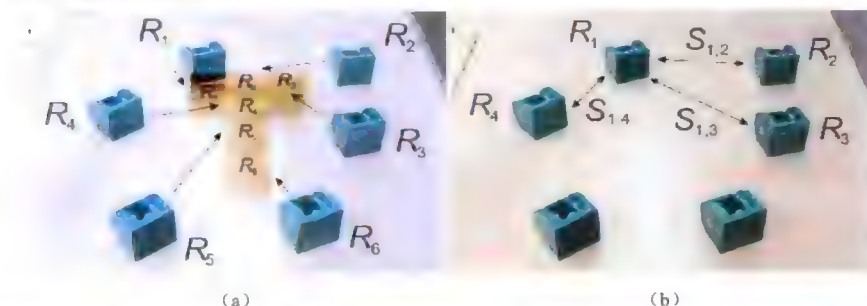
彩图1 (a) 双边连接 R_k ; R_p 的例子; (b) 几个 1DoF 连接生成一种宏观运动; 图 (c) 和图 (d) 由许多机器人模块实现的宏观功能的两个例子 (参见内文 p. 125)



彩图2 自组织方案中不同的设想步骤。图 (a) 为初始阶段——所有机器人在场景中不规则地分布; 图 (b) 中, 所选模块接近以便对接; 图 (c) 中, 模块以 2D 断开的形式排序; 图 (d) 中, 模块在 2D 栅格上对接为一个组装组织并集体激励成为 3D 状态 (参见内文 p. 126)

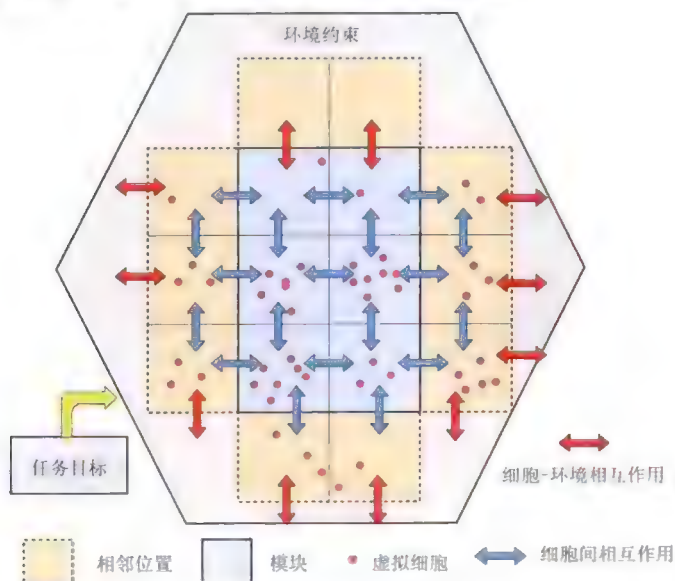


彩图5 (a) 从机器人观点出发的本地成本；(b) 全局观点，其中一些机器人不可见（参见内文 p. 131）

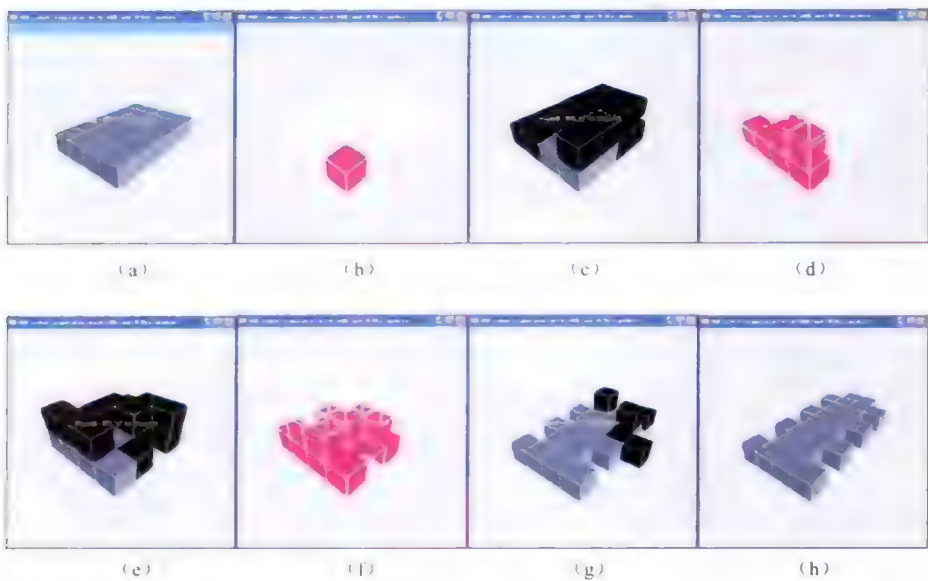


彩图6 组装问题的例子。图 (a) 是基于为每一个 $ID_i \rightarrow R_i$ 分配的方法；图 (b) 是基于为具有 $S_{1,ij}$ 的目标函数 Θ 进行线性规划的方法（其中只显示了对 R_1 的连接）（参见内文 p. 132）

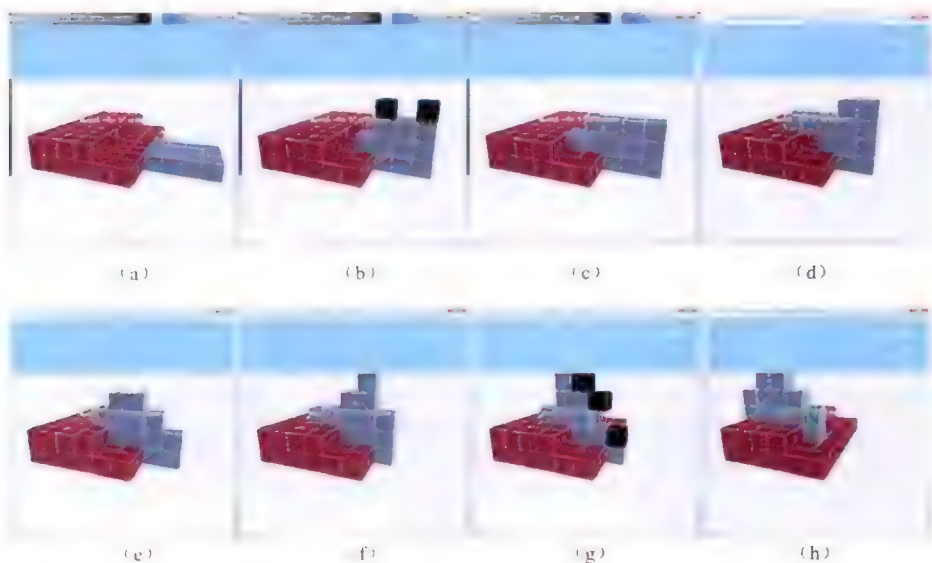
★ 第二部分第七章 模块化机器人的形态自重构



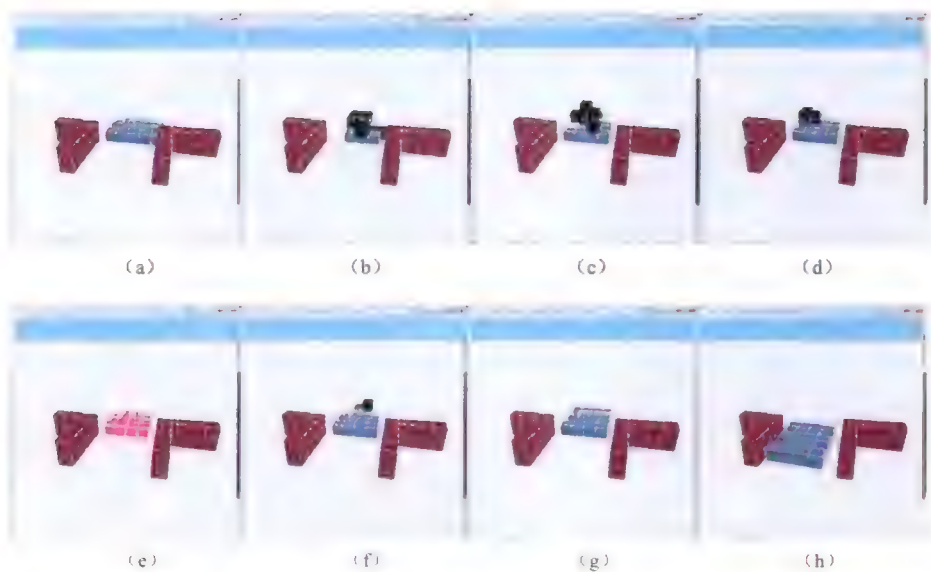
彩图7 宏观层面上基于虚拟细胞的机械化学模型（参见内文 p. 156）



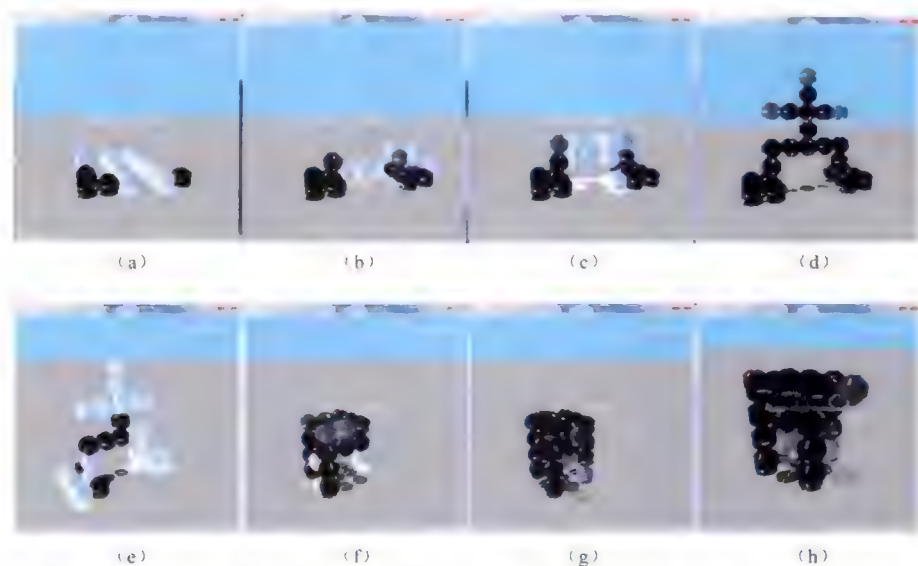
彩图 8 图 (a) ~ 图 (h) 为在开放空间中模块化机器人的汽车形态生成的一组快照 (参见内文 p. 159)



彩图 9 图 (a) ~ 图 (h) 为展示在爬越台阶过程中使用所提出的分层模型自重构过程的快照 (参见内文 p. 160)

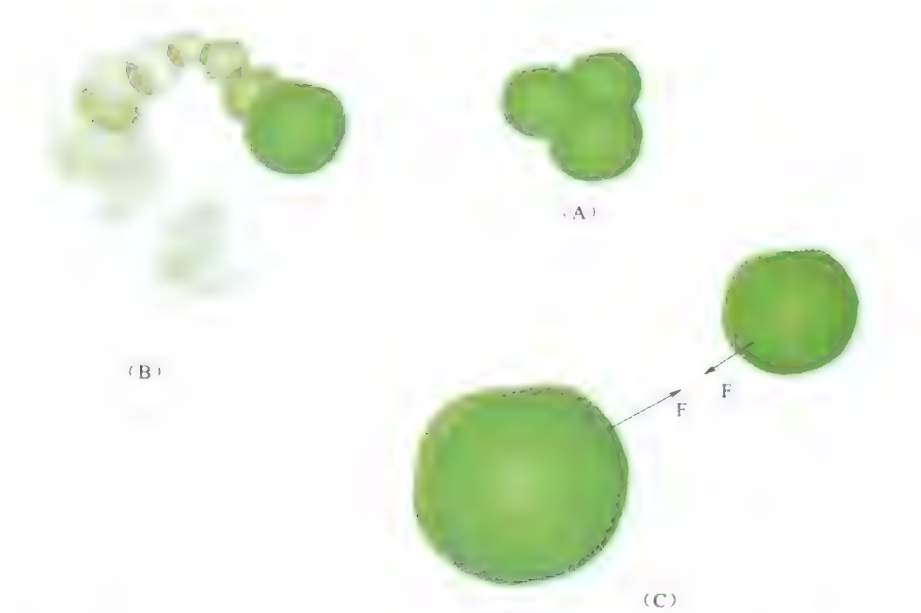


彩图 10 图 (a) ~图 (h) 为展示机器人在变化的环境中运动时的一系列自重构过程的一组快照图。其中机器人调整其宽度以适应较窄的路径 (参见内文 p. 161)



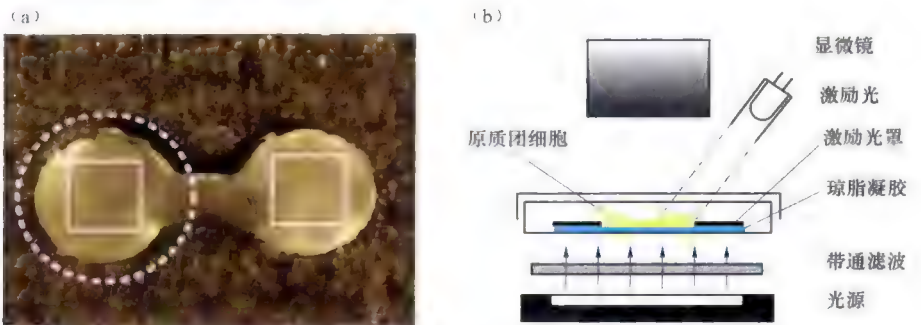
彩图 15 使用 Cross-Ball 模块和所提出的 3 层分层形态框架的——图 (a) ~图 (d) 为从蛇形形态到类人腿形态自重构的快照图；图 (e) ~图 (f) 为从类人腿形态到类汽车的 4 腿形态自重构的快照图 (参见内文 p. 165)

★ 第二部分第八章 自组装机器人中的基本问题和 Tribolon 平台上分异的一种案例研究

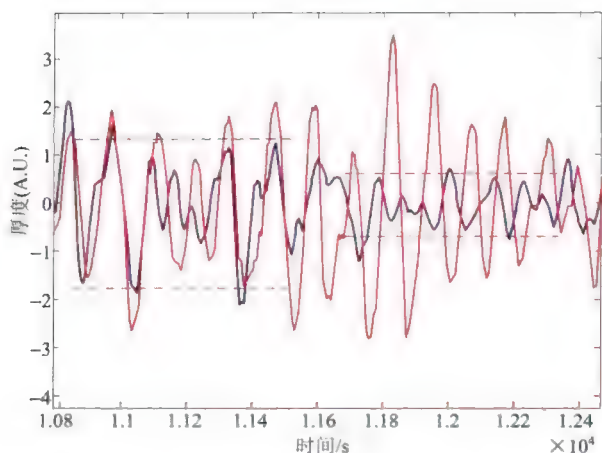


彩图 2 围绕自组装的三个基本问题 (A) 组装问题; (B) 动力学问题; (C) 相互作用问题 (参见内文 p. 174)

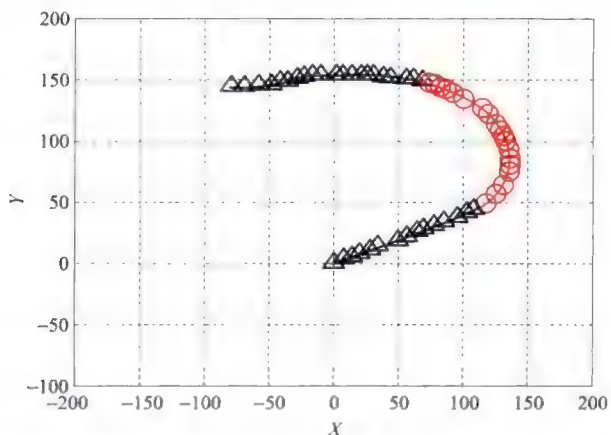
★ 第四部分第十章 关于多头绒泡菌机器人



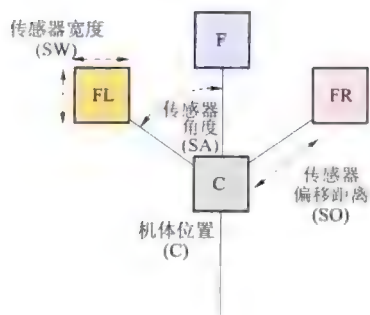
彩图 4 图 (a) 显示位于 1.5% 琼脂凝胶上的哑铃形原质团。细胞周围的黑色罩由透明薄板制成, 虚线表示暴露在白光中的区域, 两个实线方形框用来计算细胞的厚度振荡。图 (b) 为光照实验的示意图。细胞暴露在底部用来监测的带通滤波光中, 其中一个井则暴露在顶部用于激励的白光 LED 灯中, 细胞保持在培养皿中以保持其恒定的湿度条件 (参见内文 p. 221)



彩图5 多头绒泡菌原质团对光激励的典型反应。两个井中只有一个暴露在白光中（蓝色线），向下的箭头表示 LED 灯打开时的点，并一直开启直到曲线末端。光照打开后激励井（蓝色曲线）的振荡周期稍微变长，而未激励井（红色曲线）的振荡周期则未变，激励井中的振荡幅度显著减小而另一个井（水平线）中的振荡幅度则增大（参见内文 p. 222）



彩图7 由实验数据驱动的模拟汽车的轨迹。仿真中使用 $\alpha \approx \pi/720$ ，汽车从原点 $(0, 0)$ 开始。黑线表示当没有光照射井时的时间段，红色线表示右侧井被光线照射时的时间段，每 150 s 会周期性地绘制一次三角和圆形（参见内文 p. 223）

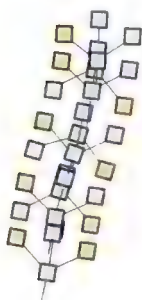


[传感阶段]

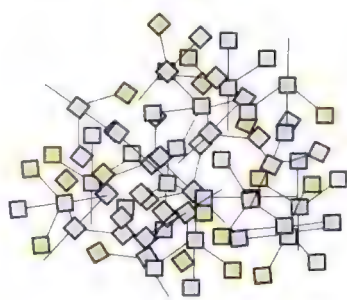
- 采集趋化因子映射值
- if ($F > FL$) && ($F > FR$)
 - 继续面向同一个方向
- Else if ($F < FL$) && ($F < FR$)
 - 根据RA向FL和FR较大的方向旋转
- Else if ($FL < FR$)
 - 由RA向右旋转
- Else if ($FR < FL$)
 - 由RA向左旋转
- Else
 - 继续面向同一个方向

(a)

(b)

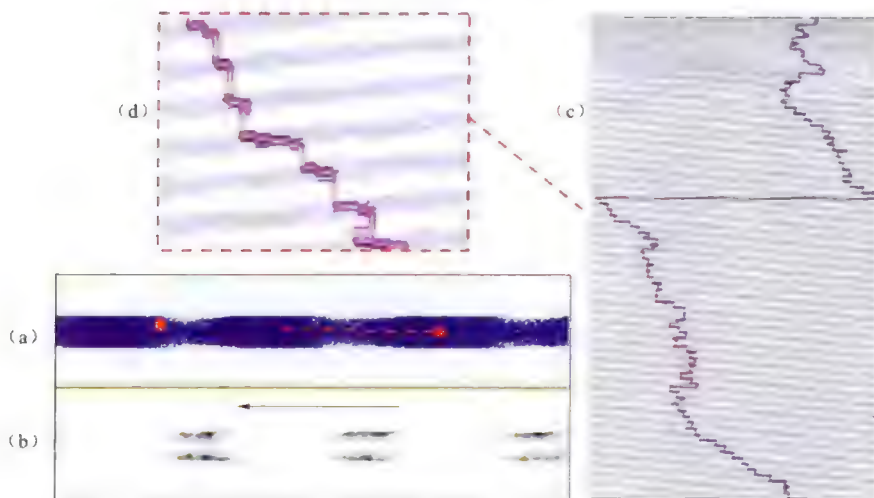


(c)

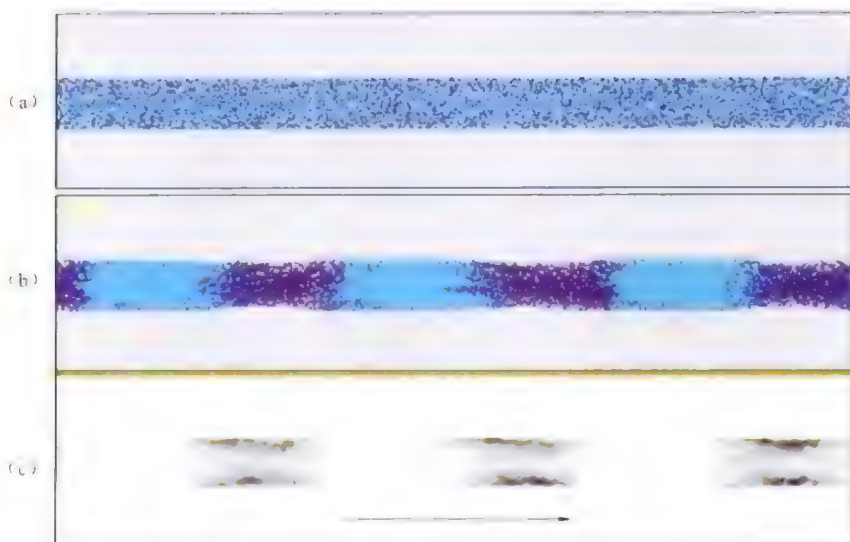


(d)

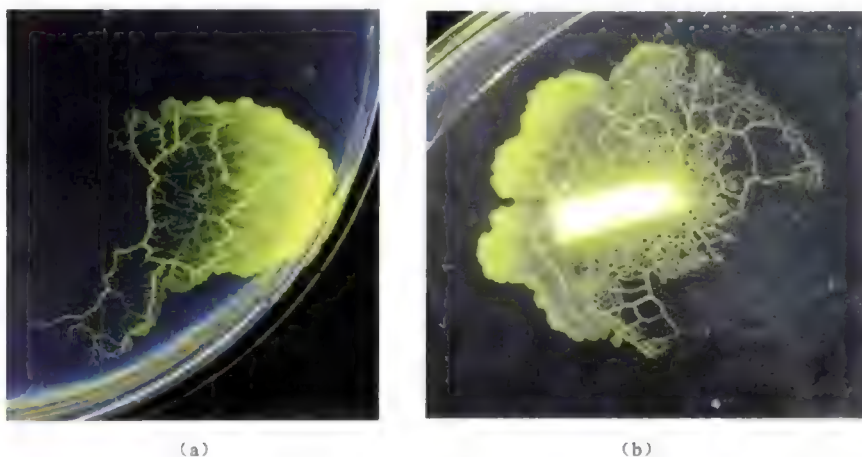
彩图 8 机体粒子图案、算法和聚集类型 (参见内文 p. 225)



彩图 12 粒子集体漂移与波传播方向相反。图 (a) 显示粒子位置与示踪粒子 (圆圈); 图 (b) 显示趋化物波传播; 图 (c) 显示示踪粒子位置叠加的空间 - 时间曲线; 图 (d) 表示示踪粒子移动 (水平移动) 倾向于发生在空闲区域 (高的趋化物通量) 的放大图 (参见内文 p. 230)



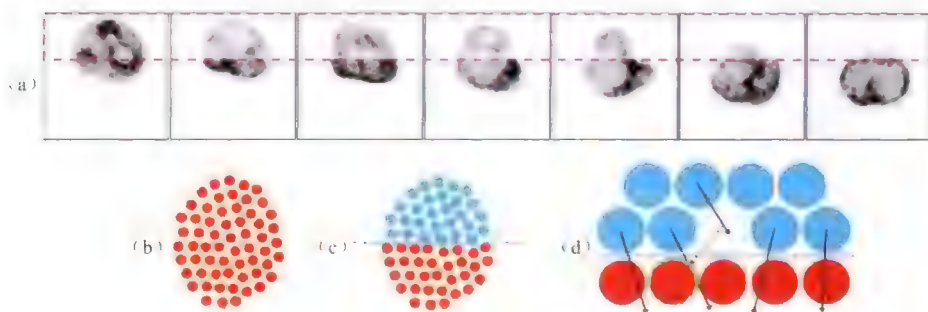
彩图 13 粒子的集体排列和行波 图 (a) 显示粒子的初始随机分布和它们的排列；图 (b) 显示当出现稳定的行波时，粒子成组地分布并具有相似的方向排列：较浅的区域朝右，而较深的区域朝左；(c) 行波中的趋化物通量向右移动（参见内文 p. 231）



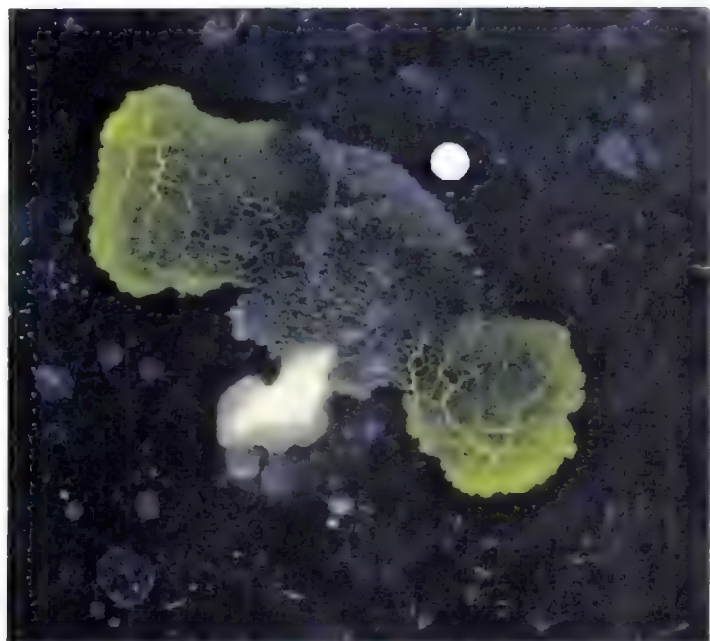
彩图 21 原质团斑点的例子：图 (a) 为自推进；图 (b) 为食物源激励。详见文献 [53]（参见内文 p. 237）



彩图 22 使用一系列燕麦片食物源导引原质团 原质团接种于最北侧的燕麦片上，并将其向南导引。实验照片，详见文献 [53]（参见内文 p. 238）



彩图 24 粒子集体避开模拟的光照射。图 (a) 中，虚线框内的区域受到模拟光照射的激励，粒子集体的振荡向未暴露区域发出行波，并使粒子集体移动远离照射区域；图 (b) 为照射前条件的示意性说明——所有粒子感受相同的趋化物浓度；图 (c) 中，照射区域（顶部）被感知为较弱的浓度；图 (d) 中，照射边界处的粒子被更多地吸引至未暴露区域，沿交界面的迁移使趋化物得以被放置，从而进一步引起向该区域的吸引和空缺空间的出现（参见内文 p. 240）

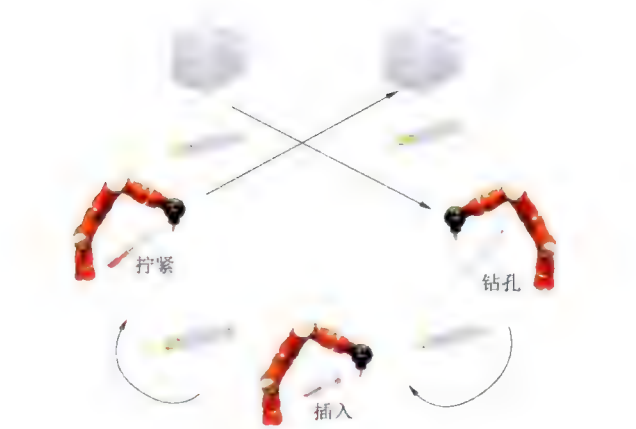


彩图 25 使用氯化钾晶粒分裂原质团斑点。白色圆盘表示盐晶粒的位置。详见文献 [53] (参见内文 p. 241)

★ 第四部分第十一章 使用有机计算原理开发自组织机器人单元



彩图 6 适应性生产单元 (参见内文 p. 262)



彩图 8 重新配置后的适应性生产单元 (参见内文 p. 266)



目 录

第一部分 自组织群机器人系统

第一章 形态机器人学——机器人系统形态和神经的一种进化发展的 自组织方法	3
1 形态机器人学的介绍	3
2 多细胞形态形成的计算模型	5
3 群机器人的形态自组织	6
4 用于自组织重构的形态模块化机器人	13
5 形态脑-体的共同发育	14
6 关于进化发育机器人学 (Evo-Devo-Robo)	18
7 结论	19
致谢	19
参考文献	19
第二章 如何设计机器人机体和机器人群? ——具身自组织系统中的 仿生、拟生和人工进化	24
1 介绍	25
2 群机器人学中的仿生和拟生	27
3 机器人机体的进化自组织控制结构	40
4 控制器网络拓扑到体形的进化成形	43
5 讨论	45
参考文献	49
第三章 喧嚣和嘈杂环境中的多体集群控制算法	53
1 介绍	53
2 集群背景和问题提出	55
3 追踪移动目标的适应性集群控制	58
4 嘈杂环境中多机体的集群控制	62
5 稳定性分析	65

2 仿生自组织机器人系统

6 实验结果	70
7 结论和未来的工作	78
参考文献	79
第四章 遗传激励	80
1 背景：自然和社会系统中的激励	80
2 人工激励的相关工作	83
3 所提出的框架	86
4 实验	88
5 讨论	98
6 结论	100
参考文献	100
第五章 从蚁群到机器人和从机器人到蚁群：机器人如何促进对动物 集体行为的研究	103
1 介绍	103
2 为何机器人学对社会行为的研究有用?	105
3 结论	112
致谢	112
参考文献	113

第二部分 自重构模块化机器人

第六章 异构多机器人组织的自优化自组装	123
1 介绍	123
2 一般的自组装方案	124
3 优化控制器：从 Φ^s 至 Φ 的转变以及约束的作用	128
4 基于约束的优化	131
5 成组和缩放方法	135
6 执行情况 and 结果	136
7 结论	139
参考文献	140
第七章 模块化机器人的形态自重构	143
1 介绍	143
2 多细胞形态形成	146
3 一种通用的分层形态模型	146
4 Cross-Cube RM 机器人的自重构	147

5	Cross-Ball RM 机器人的自重构	161
6	结 论	166
	致谢	167
	参考文献	167
第八章 自组装机机器人中的基本问题和 Tribolon 平台上分异的		
	一种案例研究	171
1	自组装	171
2	自组装中的主要问题	173
3	案例研究	180
4	结 论	187
	致谢	187
	参考文献	187
第三部分 机器人系统中的自主式智力开发		
第九章 类人脑的时间处理		
1	介绍	193
2	大脑模型的五个部分	195
3	生物发育	196
4	为何是自主神经发育?	197
5	基本组成部分	199
6	脑叶成分分析	201
7	表示的出现	203
8	特性	205
9	实验结果	208
10	结 论	208
	参考文献	209
第四部分 特殊应用		
第十章 关于多头绒泡菌机器人		
1	介绍	213
2	实验	217
3	基于粒子模型中振荡输运现象的出现	224
4	结 果	228
5	结论和讨论	243

4 仿生自组织机器人系统

致谢	245
参考文献	245
第十一章 使用有机计算原理开发自组织机器人单元	250
1 介绍	250
2 挑战	252
3 架构	255
4 一个自适应生产单元的例子	261
5 结论	267
致谢	268
参考文献	268

第一部分

自组织群机器人系统

第一章 形态机器人学——机器人系统形态和神经的一种进化发展的自组织方法

Yaochu Jin, Yan Meng

Yaochu Jin, 萨里大学计算机系, 英国, 萨里, 吉尔福德, GU2 7XH,
e-mail: yaochu.jin@surrey.ac.uk

Yan Meng, 斯蒂文斯理工学院电子和计算机工程系, 美国, 霍博肯,
NJ 07030, e-mail: yan.meng@stevens.edu

摘要: 形态形成可以被认为是一种由自然进化塑造的自组织过程, 这其中包括自然界中发现的两种主要的适应机制。形态机器人学的主要基本原理是在机器人技术中应用进化发展的方法来设计自组织、自重构和自修复的单个或多个机器人系统。我们把这些方法分为三个方面, 即形态群机器人系统、形态模块化机器人学以及机器人系统机体和大脑的共同发展。本章对形态机器人学进行了简单的介绍, 同时举例说明了在变化的环境中如何将进化发展原理应用于群机器人中。我们还描述了遗传驱动的神经和形态开发以及活动依存性神经开发的计算模型。就像在自然界和模拟系统中发展机制通常是由进化形成的一样, 我们认为进化发展的机器人学很自然地是下一步发展的方向。

1 形态机器人学的介绍

动物身体的发育包括创建体型轮廓和神经系统的所有过程, 这些过程有细胞分裂、原胚胎形成、神经胚胎形成和器官形成^[55]。一些生物体, 比如两栖动物, 还会经历一个被称为变形的过程, 在该过程中, 生物的外形和大小都会发生变化^[5]。过去的十年里, 在认识控制生物形态发生的分子和细胞机制中的进化发展生物学^[10] (通常被称为 evo-devo) 和系统生物学在理论和技术上都取得了迅速的进步, 这些进步不仅有助于我们进一步认识诸如人类死亡的生物学过程, 还为我们设计工程系统提供了新的有力工

4 仿生自组织机器人系统

具。例如：越来越多的证据表明，生物体形态形成可认为是在基因和环境因素控制下通过细胞和分子的相互作用实现的自组织和自组装过程^[2,50]。此外，生物形态形成还表现出惊人的稳健度^[3]。正是由于生物形态形成具有这些诱人的特性，人们才将许多注意力转向应用基因和细胞机制来设计机器人系统，尤其是自组织群机器人系统和自重构模块化机器人。除此以外，人们还对人工生命和机器人中使用进化发展的方法设计机器人中的机体和神经控制器进行了大量的研究^[51,53,54]。

本章将对形态机器人学进行简要的介绍。形态机器人学是由本文作者在2009年首次提出的，当时首先在维基网页上进行了报道^[17]，随后在文献[20]中正式地提出。一般地，形态机器人学是指将引起生物体形态形成的基因和细胞机制应用于机器人学的研究领域，它包括以下三个主要主题：

- 形态群机器人系统，应用基因和细胞机制^[12, 13, 29, 49]处理群机器人的自组织。
- 形态模块化机器人，其中模块化机器人应用形态形成原理根据当前环境条件自主调整其构型^[34,33,35]。
- 发展方法，用来设计机器人机体或机体部件及其神经控制器^[15,26]。

神经系统发育可进一步分为活动无关^[18]和活动依存性神经系统发育^[6]。活动无关的神经系统发育牺牲了神经系统的初始结构，主要由遗传网络进行调控，而活动依存性神经系统发育则能够完善神经活动驱动的神经过通性。但活动无关和活动依存性神经系统发育之间并不存在明确的分界线。神经系统科学最近的发现表明，包括神经细胞增殖、迁移、分化轴突生长和树突生长在内的早期神经系统发育会或多或少地受到自发神经活动的影响。另一方面，活动依存性神经可塑性还涉及基因表达中的变化，即活动依存性神经系统发育最终还会受到遗传网络的调控。

不必将形态机器人学的三个领域完全隔离开来。例如：形态形成原理可同时应用于混合群和模块化机器人系统，这其中大量的群机器人可以组装成单个“模块”机器人，然后还可以再次拆解为多个单独的机器人。同时，模块化机器人可以利用形态学和控制器的设计开发来完成复杂的任务。

创建这一新的术语是为了填补发育机器人和有智力动物的神经系统发育之间的空白，而对于传统的发育机器人，通常被称为外遗传机器人，人们将注意力主要集中在认知能力的开发上，而忽略了机体和神经系统的物理发育。

2 多细胞形态形成的计算模型

2.1 生物体的形态形成和变形

动物的形态形成分为早期的胚胎发育和后期的胚胎发育两个阶段^[9]，典型的早期胚胎发育包括细胞分裂、原胚胎形成和枢椎形成，后期的胚胎发育主要是神经系统的发育，它开始于神经细胞和神经胶质细胞从外胚层分离的过程^[47]。图1所示为海葵形态形成过程实例。

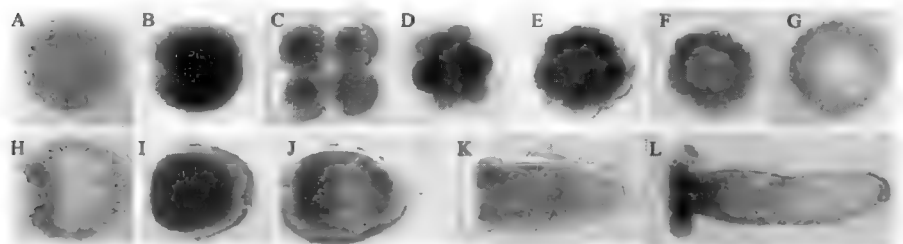


图1 海葵的变形。发育阶段为：卵（A）、桑葚胚（B~F）、囊胚（G）、原肠胚（H）、幼体（I、J）、息肉（K、L）。摘自文献 [27]（见书后 p.1 彩图1）

变形是生物发育过程中的另一个有趣的阶段，有两种类型的变形，即不完全变形和完全变形。经历不完全变形的生物体有三个发育阶段，其中的稚虫与长成后相似。相比之下，经历完全变形的生物体具有四个发育阶段，其中生物体的外形在每一阶段都发生剧烈的变化。

2.2 发育基因调控网络的模型

生物的形态形成过程受到基因调控网络（GRNs）的控制，为了更加深入地认识引起形态形成中电子杂交定位的遗传和细胞原理，有必要建立发育基因网络的数学模型。最近几年里报道了许多关于信号传递和发育基因网络计算模型的研究工作，人们已经应用这些网络模型依靠实验数据重构了生物中的一种基因调控子网络，并且分析了生物基因网络的基本特性，比如稳健性和可进化性。

在描述多细胞生物的形态形成中，必须考虑细胞和它们对基因表达动力学影响之间的相互作用，Mjolsness 等人^[36]提出了一种考虑了细胞之间转录因子扩散的广义 GRN 模型：

6 仿生自组织机器人系统

$$\frac{dg_{ij}}{dt} = -\gamma_j g_{ij} + \phi\left(\sum_{l=1}^{n_g} W^l_{ji} g_{il} + \theta_j\right) + D_j \nabla^2 g_{ij} \quad (1)$$

其中 g_{ij} 表示在第 i 个细胞中第 j 个基因产物（蛋白质）的浓度，方程（1）中等号右侧的第一项表示蛋白质以速率 γ_j 退化，第二项表示蛋白质的产生率，最后一项描述蛋白质以速率 D_j 扩散。 ϕ 为产生蛋白质的激励函数，通常将其定义为 sigmoid 函数 $\phi(z) = 1/[1 + \exp(-\mu z)]$ 。基因间的相互作用由相互作用矩阵 W^l 描述，矩阵中元素可以是活性的（正值）或抑制的（负值）。 θ_j 为活化基因表达的阈值， n_g 为蛋白质的数量。

图2中说明了细胞与细胞的相互作用，其中细胞1的基因1由其自身蛋白质激活，并且受到细胞2中基因1所产生蛋白质通过扩散的抑制。与此类似，细胞1中的基因2由其自身蛋白质激活，并受到细胞2中基因2所产生蛋白质通过扩散的抑制。

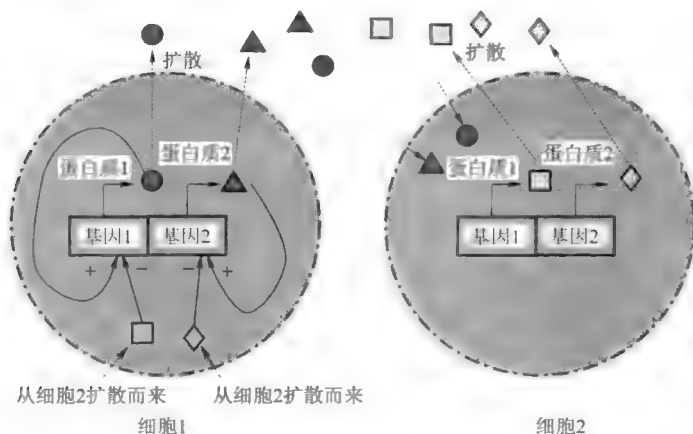


图2 多细胞系统中细胞信息传递的说明

3 群机器人的形态自组织

3.1 群机器人系统

群机器人系统由许多机器人组成。单独一个机器人通常只拥有低的计算能力和有限的通信能力，所以只能完成简单的工作。而如果应用合适的控制机制，可使得许多机器人一起工作来完成复杂的任务。通常认为应用分散控制策略的群机器人系统具有更好的柔性和稳健性。群机器人系统的典型应用包括成组运输、搜寻、形状形成、边界覆盖、城市搜索和救援，

以及未知环境勘测。但群机器人系统分散控制算法的设计迄今仍是一个挑战^[30]。

3.2 群机器人系统和多细胞系统之间的一种抽象关系

3.2.1 细胞-机器人映射

为了将生物形态形成中的遗传和细胞机制应用于群机器人的自组织行为，有必要在多细胞系统和多机器人系统之间建立一种抽象关系，在这种抽象关系中，将机器人最重要的功能映射为细胞的浓度。在文献[13, 18, 31]中，将机器人的位置和速度用一些基因的蛋白质浓度来描述，这些基因的表达受到它们之间的相互影响。典型地，对于一个位于三维空间中的机器人，需要三个蛋白质来表示机器人的位置，另外三个蛋白质来表示机器人的速度。但需要注意的是，代表了机器人速度和位置的蛋白质浓度的数学定义并不能满足位置和速度之间精确的物理关系，所以本文中可将速率看作是机器人的固有状态。

有了细胞和机器人之间的上述抽象关系，就可以用 GRN 模型描述每一个机器人的运动动力学，这里用两种 G 型蛋白质的浓度分别表示机器人的 x 和 y 位置，用 P 型蛋白质的浓度表示机器人的一种固有状态。

$$\begin{aligned}\frac{dg_{i,x}}{dt} &= -az_{i,x} + mp_{i,x} \\ \frac{dg_{i,y}}{dt} &= -az_{i,y} + mp_{i,y}\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\frac{dp_{i,x}}{dt} &= -cp_{i,x} + kf(z_{i,x}) + bD_{i,x} \\ \frac{dp_{i,y}}{dt} &= -cp_{i,y} + kf(z_{i,y}) + bD_{i,y}\end{aligned}\quad (3)$$

其中 $i=1, 2, \dots, n$, n 为系统中总的机器人（细胞）数量； $g_{i,x}$ 和 $g_{i,y}$ 分别为第 i 个机器人的 x 和 y 位置，对应于两种 G 型蛋白质的浓度； $p_{i,x}$ 和 $p_{i,y}$ 为两种 P 型蛋白质的浓度，分别表示第 i 个机器人沿 x 和 y 坐标的固有状态； $D_{i,x}$ 和 $D_{i,y}$ 为第 i 个机器人与其相邻机器人间距离的和，对应多细胞系统语言中从相邻细胞扩散而来的 G 型蛋白质浓度的和。在数学上，我们有：

$$D_{i,x} = \sum_{j=1}^{N_i} D_{i,x}^j, \quad D_{i,y} = \sum_{j=1}^{N_i} D_{i,y}^j \quad (4)$$

其中 N_i 表示机器人 i 的数量； $D_{i,x}^j$ 和 $D_{i,y}^j$ 为由机器人 i 接受的从机器人 j 扩散而来的蛋白质浓度，它们可以定义为：

$$D_{i,x}^j = \frac{(g_{i,x} - g_{j,x})}{\sqrt{(g_{i,x} - g_{j,x})^2 + (g_{i,y} - g_{j,y})^2}} \quad (5)$$

$$D_{i,y}^j = \frac{(g_{i,y} - g_{j,y})}{\sqrt{(g_{i,x} - g_{j,x})^2 + (g_{i,y} - g_{j,y})^2}} \quad (6)$$

调控模型中的扩散项模仿了多细胞系统中细胞与细胞之间的信号传递,对于群机器人系统,这将需要每一个机器人都能够探测到与其相邻机器人间的距离,而这在实际中很容易实现。

3.2.2 用成形素梯度表示目标形状

在生物体形态形成过程中,成形素浓度梯度控制细胞命运走向,并且在认识样本形成过程中起着关键作用^[1]。在群机器人成形现在使用的基因调控模型中,目标形成信息还可以根据成形素梯度得到。成形素梯度用式(3)中的 f_i 表示,对于一个二维的目标形状, $f(z_i)$ 可以定义为:

$$\begin{aligned} f(z_{i,x}) &= \frac{1 - e^{-z_{i,x}}}{1 + e^{-z_{i,x}}} \\ f(z_{i,y}) &= \frac{1 - e^{-z_{i,y}}}{1 + e^{-z_{i,y}}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $z_{i,x}$ 和 $z_{i,y}$ 分别为沿 x 轴和 y 轴的梯度,它们可用一解析函数 h 描述:

$$z_{i,x} = \frac{\partial h}{\partial g_{i,x}}, \quad z_{i,y} = \frac{\partial h}{\partial g_{i,y}} \quad (8)$$

这里 h 用来定义机器人预计形成的形状。

本文中使用的多细胞系统和多机器人系统之间的映射关系,在图3中给出。

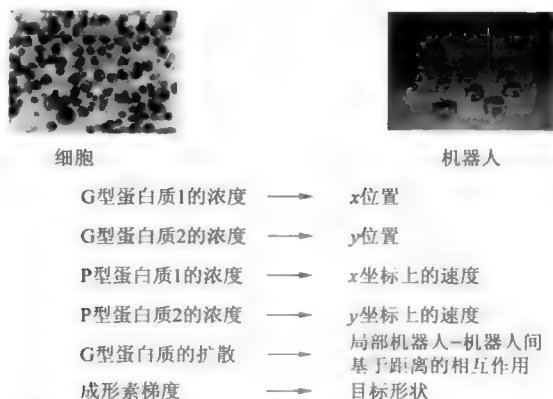


图3 多细胞系统和多机器人系统之间的抽象关系

3.3 从形状的解析表示到任意的形状表示

根据成素梯度表示群机器人系统的目标形状是自组织系统形态形成设计中一个重要步骤,表示一个形状最简单的方法是使用解析函数。例如,如果需要众多机器人组成一个单位圆,则可以使用下面的函数:

$$h = (g_{i,x}^2 + g_{i,y}^2 - 1)^2 \quad (9)$$

但使用这种形状表示方法存在三个潜在的问题:首先,形状的复杂性受到限制,解析函数通常只能描述封闭的二维形状;其次,用来描述形状的算法需要一个全局坐标系,这在分散系统时是一个大问题;再者,只能在一个预定的位置形成形状。可以使用参数化的形状表示模型,比如 Bézier, B 样条和非均匀有理 B 样条 (NURBS) 可以来解决这些问题^[31]。

NURBS 曲线由其阶数,一组权重控制点和一个结点矢量确定,控制点确定了曲线的形状,结点矢量是一组确定控制点在哪里和怎样影响 NURBS 曲线的参数。NURBS 模型能够在二维或三维的笛卡尔空间内表示曲线或曲面。令 $B_{i,k}(u)$ 为 NURBS 模型的 B 样条基函数,其中 i 对应于第 i 个控制点, k 表示基函数的次数。在 NURBS 模型中,曲线可以定义为一组具有 $n+1$ 个控制点 p_i 的分段有理基函数的组合,相应的权重为:

$$c(u) = \frac{\sum_{i=1}^n p_i w_i B_{i,k}(u)}{\sum_{i=1}^n p_i B_{i,k}(u)} \quad (10)$$

其中 n 为控制点的数量; u 为表示 NURBS 中的一个参数。对于次数为 $k-1$ 的基函数, NURBS 曲线具有 $n+k+1$ 个结点 t_i , t_i 以非递减顺序排列: $t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_{n+k}$ 。基函数可用递归的方法定义为:

$$B_{i,k}(u) = \begin{cases} 1, & t_i \leq u \leq t_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$B_{i,k}(u) = \frac{u - t_i}{t_{i+k+1} - t_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{t_{i+k} - u}{t_{i+k} - t_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u) \quad (12)$$

参数的范围为 $t_{k-1} \leq u \leq t_{k+1}$ 。

图 4 所示为使用 17 个机器人形成一鸟群形状时的仿真结果。起始时机器人在区域内任意分布,通过竞争过程选择一个参考机器人,其中使得具有最大相邻机器人数的机器人获胜。在基于 GRN 的动力学的驱动下,机器人群将自发地形成目标形状。图 4 中还给出了 17 个机器人形成一鸟群形

状的快照图, 关于本部分工作的更详细的内容参见文献 [12]。

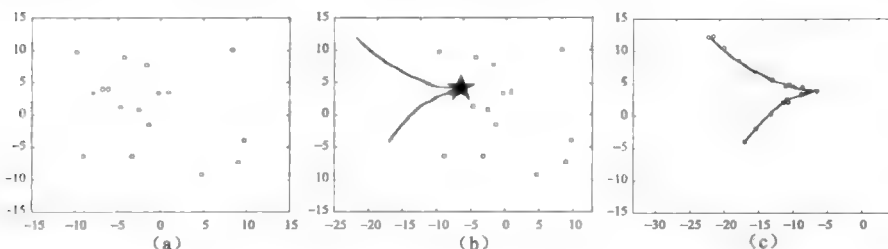


图4 17个相似机器人形成鸟群形状过程的快照^[12]。图(a)为随机初始化;图(b)为通过竞争确定参考机器人(星形表示);图(c)为目标形状的出现

3.4 从预定义目标形状到自适应形状的产生

在前面的模型中, 都假设由机器人构建的目标形状是事先已知的, 所以就可以预先定义。但是, 如果目标形状必须跟随外界环境变化时, 这种假设将不再成立。为了解决这类问题, 人们提出了一种由两层组成的分级 GRN (H-GRN) 网络^[19], 如图 5 所示。层 1 根据蛋白质浓度产生各种形态, 而蛋白质浓度则取决于给定的环境, 比如, 要跟踪或诱捕的目标的位置。层 2 负责控制机器人的运动动力学, 其中 G 型和 P 型蛋白质分别代表了机器人的位置和固有状态矢量。如果形态是在一个二维 (2D) 空间中产生的, 那么 G 和 P 的矢量长度为 2, 而在一个三维空间中, 位置和固有状态矢量的尺寸都为 3。我们注意到只有 G 型蛋白质才能扩散进入其他细胞中并影响其他机器人的运动动力学。GRN 层 2 的功能与前一节描述的单层 GRN 的相似。

从上面的讨论中我们注意到, 由层 1 产生的形态与生物形态形成中的成形态梯度具有相似的作用, 由额外增加的 GRN 层来产生形态的主要优点是, 它能够使处于变化的环境中的系统产生一个所期望的环境适应性形态, 这在预先定义的目标形态中是不可能实现的。

我们注意到, 层 1 的 GRN 只有当机器人探测到一个或者多个目标时才是激活的, 根据所探测到的目标的位置来产生目标形态, 我们将这种机器人称为组织机器人。一旦在组织机器人中产生了目标形态, 这些机器人中层 2 的 GRN 的动力学将被激活, 并导引机器人向目标形态发展。而没有探测到任何目标的机器人将遵循组织机器人的运动, 直到它们自己探测到目标为止, 到那时候, 它们自己变成了组织机器人; 层 1 的 GRN 将被激活,

产生目标形态，且最终机器人在层 2 的 GRN 动力学的引导下向目标形态移动。

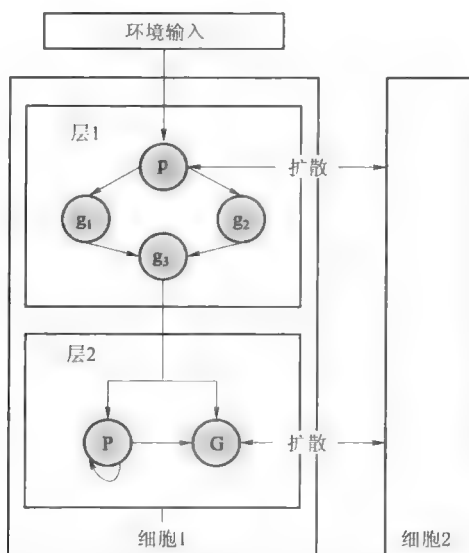


图 5 H-GRN 的示意图。层 1 为具有四个蛋白质的 GRN，其中：蛋白质 p 能够由环境输入调控；蛋白质 g_3 为成形态素梯度，用来描述所要形成的形态。蛋白质 g_3 影响蛋白质 G 和 P 的产生；蛋白质 G 和 P 分别表示机器人的位置和速度矢量

为了验证 H-GRN 的适应性形态形成的能力，我们进行了仿真分析，图 6 中给出了适应性形态形成仿真结果的一些快照图。在仿真过程中，有两个目标在所考虑的区域内移动，更进一步，它们能够移动得相距甚远从而使得需要两分开的形态。这些结果表明在没有任何集中控制下，所提出的模型对于适应性形态形成是适合的。

我们同时还使用实物机器人进行概念证明的实验，实验中有两目标（用一张黄色纸遮盖的 e-puck 移动机器人）被其他八个机器人诱捕。这一功能得到实现，如图 7 所示。此后，其中一个机器人移出八个机器人已经形成的圆形形状，这时，环境变化应能被自动探测到并需要构建一新的形态，一旦新的形态构建完成，八个机器人将再次形成诱捕两目标的新的形状，这一适应性过程在图 8 中给出。

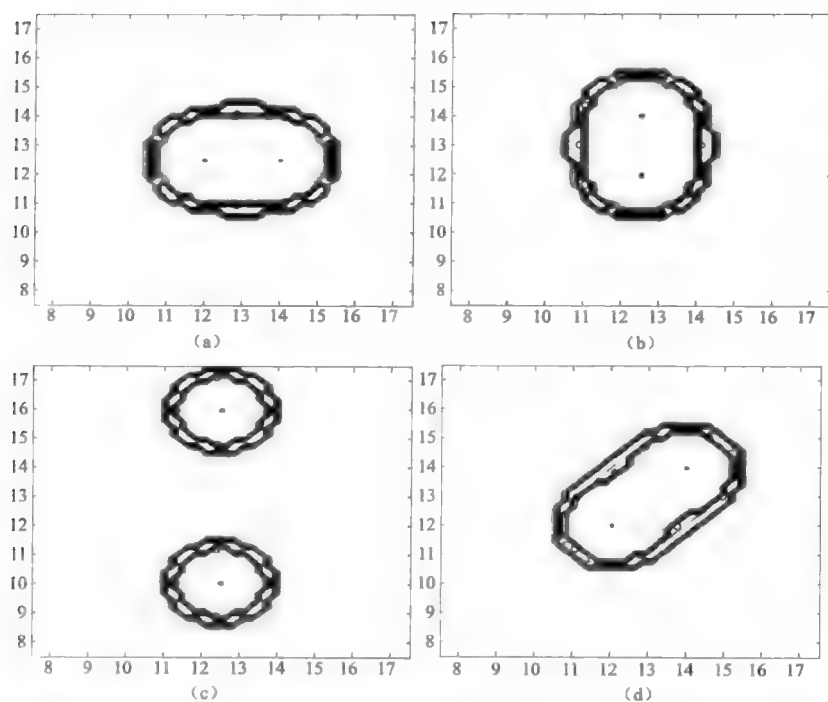


图6 图 (a) ~ 图 (d) 是表示需要诱捕的目标移动时适应性形态形成的仿真结果快照 (见书后 p. 1 彩图 6)

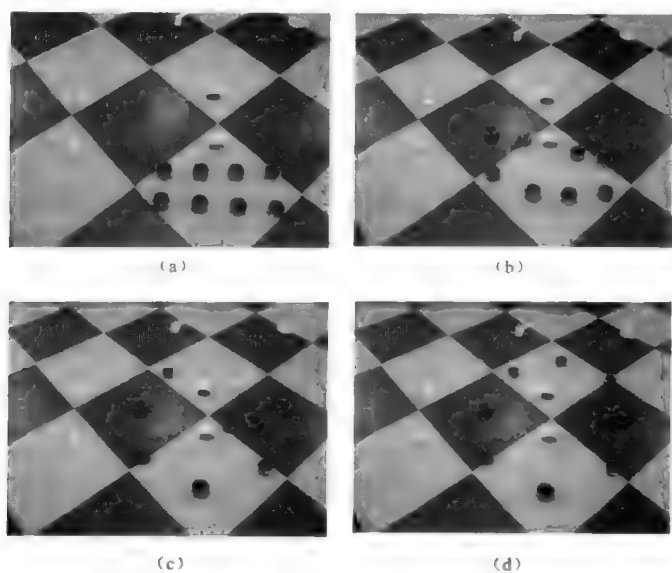


图7 图(a) ~ 图 (d) 是两个目标 (用一张纸覆盖的) 被其他八个由 H-GRN 模型组织机器人诱捕的实验结果快照 (见书后 p. 2 彩图 7)

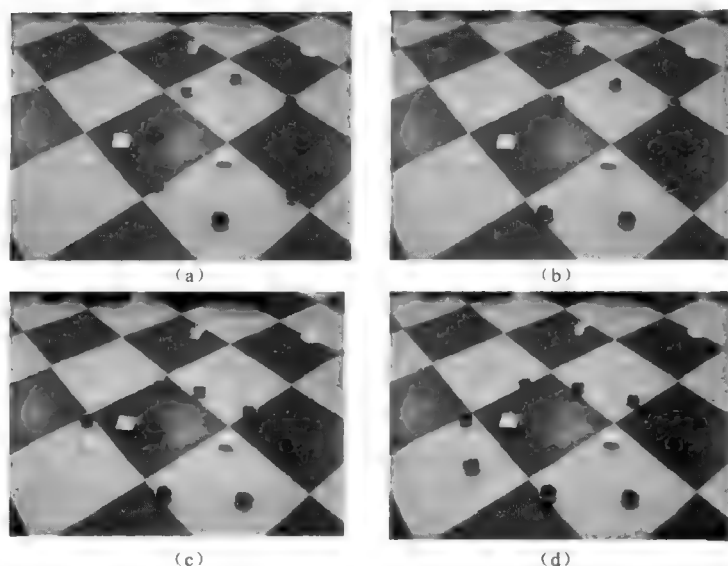


图8 图(a)~图(d)中,目标形状的适应性和形状的再形成以保持对目标的诱捕(见书后 p. 2 彩图8)

3.5 中间总结

与现有的方法相比^[16], 自组织群机器人系统的形态形成方法具有以下优点。第一, 可以将全局特性以成形态梯度的形式植入机器人动力学中, 这里的全局特性指形态形成前后的目标形状。在形态形成过程中, 可以使用参数化模型来描述全局形状, 比如一个能够同时表示解析的和自由形式形状的NURBS模型。然后由GRN模型自动产生内部的局部相互作用规则, 从而可产生全局特性, 这可以用严格的数学证明来保证。第二, 形态形成方法对系统和环境中的扰动是稳健的。第三, 研究已经表明, 形态形成方法能够为多机器人形状形成和边界覆盖提供统一的框架^[12], 这是因为目标形状的表达与特定的全局坐标系统无关。最后但并非最不重要, 形态形成框架能够在变化的环境中自动产生形态, 据我们所知, 这在其他文献中还没有被报道过。

4 用于自组织重构的形态模块化机器人

可自重构模块化机器人由许多模块组成, 并能够通过重新调整它们的

模块使其形状适应不断变化的外部环境^[39]。每一个模块都是一个物理的或虚构的“机体”，这些机体都包含有控制器。可重构机器人系统已经构建了诸如 M-TRAN^[38] 和 Molecube^[40] 的物理模块化机器人，以及诸如 Karl Sims 的虚拟生物^[51] 和 Framsticks^[25] 的虚拟生命。

可重构模块化机器人与多细胞生物之间的关系似乎更加直接，模块化机器人中的每一个单元可看作是一个细胞，多细胞生物中的细胞和模块化机器人中的模块之间在控制、通信和物理相互作用上具有相似性。此外，模块化机器人和多细胞生物的全局特性是通过单元的相互作用来显现的，这包括模块化机器人中的机械、磁学和电子机制，以及多细胞生物中的化学扩散和比如黏附之类的细胞物理相互作用。这样，使用生物形态形成机制开发可自重构模块化机器人的控制算法是一个很自然的想法^[56, 34, 33, 35]，与此相关的更加具体的内容参见文献 [34, 33, 35]。

就像前面讨论的，群机器人系统和模块化机器人之间也存在一种联系，这种联系在群机器人系统中的单个机器人组装为模块化机器人时显现；反过来也一样，由单个机器人组成的群机器人可再次拆解为群机器人。

5 形态脑 - 体的共同发育

5.1 一种神经网络和形态发育的 GRN 模型

动物形态的生长是在 GRNs 和细胞物理相互作用的控制下完成的，将用于结构设计的细胞生长模型进行推广，人们提出了用于早期动物神经系统^[21] 和机体^[48] 发育的 GRN 模型。在 GRN 模型的基因组中，每一个基因由大量结构单元 (SUs) 组成，这些结构单元又是由大量调控单元 (RUs) 来控制。RUs 可以处于激活状态 (RU^+) 或者抑制状态 (RU^-)。当 SUs 被激活时，它们将产生蛋白质，这些产生的蛋白质或者是负责细胞的行为，比如细胞分裂、细胞死亡、细胞迁移和轴突生长，或者是调控结构单元的活化，后者也被称为转录因子 (TFs)。如果 TF 只能调控细胞内的细胞，则将其称为内部 TF；而如果 TF 还能够扩散至细胞外并可以调控其他细胞的基因，则将其称为外部 TF。TF 可以同时是内部 TF 和外部 TF。图 9 中给出了描述神经系统发育的细胞模型中染色体的例子，从图中我们注意到，单个或者多个 RUs 可以调控单个或者多个 SUs 的表达。

RU ⁺	RU ⁻	SU ^D	SU ^M	RU ⁺	RU	SU ^M	SU ^A	SU ^{TF}	RU ⁺	SU ^{TF}
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	----	-----------------	-----------------	------------------	-----------------	------------------

RU⁺: 活性调控单元 RU⁻: 抑制性调控单元
 SU^D: 细胞分裂 SU^M: 细胞迁移
 SU^A: 轴突生长 SU^{TF}: 转录因子产生

图9 描述神经系统发育的染色体的例子

TF 是否能够影响 RU，取决于 TF 和 RU 的亲合力值的匹配程度，如果 TF 和 RU 的亲合力值之间的差小于预先定义的阈值 ε ，则 TF 能够调控 RU。第 i 个 TF 和第 j 个 RU 之间的亲合力匹配 ($\gamma_{i,j}$) 定义为：

$$\gamma_{i,j} = \max(\varepsilon - |\text{aff}_i^{\text{TF}} - \text{aff}_j^{\text{RU}}|, 0) \quad (13)$$

如果 $\gamma_{i,j}$ 大于零且第 i 个 TF 的浓度 c_i 大于在第 j 个 RU 中定义的阈值 (ϑ_j)，则第 i 个 TF 影响第 j 个 RU。

这样，由该 RU (用 $a_j, j=1, \dots, N$ 表示) 贡献的激活水平共计 $a_j = \sum_{i=1}^M |c_i - \vartheta_j|$ ，其中 M 为已有的 TFs 的数量。由 N 个 RUs 调控的第 k 个基因的表达式水平定义为：

$$\alpha_k = 100 \sum_{j=1}^N h_j a_j (2s_j - 1) \quad (14)$$

其中 $s_j \in (0, 1)$ ，表示第 j 个 RU 的符号 (激活状态为正，抑制状态为负)； h_j 为表示第 j 个 RU 强度的参数。如果 $\alpha_k > 0$ ，则第 k 个基因被激活，并在 SUs 中将与其对应的特性进行编码。

产生 TF 的 SU 可对与 TF 相关的所有参数进行编码，比如亲合力值、衰减率 D_i^f 、扩散率 D_i^c ，以及所产生的 TF 的数量：

$$A = \beta \frac{2}{1 + e^{-20 \cdot f \cdot \alpha}} - 1 \quad (15)$$

其中 f 和 β 都在 SU^{TF} 中进行了编码。

由 SU 产生的 TF 可以一部分是内部的，另一部分是外部的，为了确定所产生的外部 TF 部分的多少，在相应的基因中还对百分比 ($p^{\text{ex}} \in (0, 1)$) 进行了编码。这样， $p^{\text{ex}} A$ 为外部 TF 的量， $(1 - p^{\text{ex}}) A$ 为内部 TF 的量。

为了在模拟 TFs 扩散时变得简便，将细胞置于划分为大量网格的环境中。外部 TFs 位于细胞中心周围的四个网格点上，它们首先经历扩散过程 (式 (16))，其后经历衰减过程 (式 (17))：

$$u_i(t) = u_i(t-1) + 0.1 \cdot D_i^f \cdot (G \cdot u_i(t-1)) \quad (16)$$

$$u_i(t) = \min((1 - 0.1 \cdot D_i^c) u_i(t), 1) \quad (17)$$

其中 u_i 为在所有网格点上第 i 个 TF 的浓度矢量； G 为定义邻近网格点的矩阵。

SUs 编码细胞特性和相关参数，控制细胞分裂的 SU 编码分裂的角度，

指明子细胞的位置。而含有控制细胞死亡的活性 SU 的细胞将在时间步长结束时死亡。

上述细胞模型已经被用来模拟形态发育和神经系统发育^[21, 48]，比如 *C. Elegans* 的产生生命的实验中，在计算域（母系成形成素梯度）中应用了两个预扩散但没有衰减和扩散的外部 TFs，第一个 TF 在 x 方向上具有一个恒定的梯度，第二个 TF 在 y 方向上具有恒定的梯度。图 10 中给出了自稳定细胞生长的快照图。

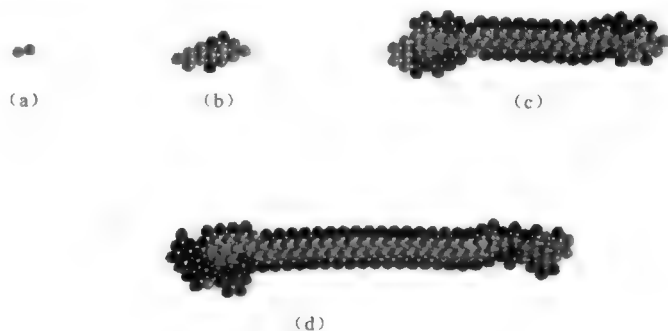


图 10 图 (a) ~ 图 (d) 为文献 [48] 中给出的在 GRN 模型控制下的自稳定细胞生长（见书后 p. 3 彩图 10）

5.2 依赖于活性的神经系统发育

生物学研究发现，大脑中神经细胞的结构和连接权会根据神经活性随时间发生变化²³，这是由于相关基因的表达发生变化引起的^[7]。根据神经系统科学和系统生物学中的发现，将基因调控网络模型与 Bienenstock、Cooper 和 Munro (BCM) 脉冲神经网络⁴相结合来模仿神经元突触和神经可塑性³²。基于 BCM 的脉冲神经网络 (SNN) 为一个用加权边缘和定向边缘代替突触的图形，如图 11 所示，脉冲神经网络的权重、权重可塑性以及元可塑性都将由 GRN 来调控，而 GRN 也将受到它所寄生的神经细胞活性的影响，且这种影响是一种闭环影响。

为了优化基因调控网络的参数，我们应用一种高效的进化算法，即协方差矩阵自适应进化策略 (CMA-ES)^{23, 24]}，图 12 给出了整个系统的示意图。

GRN-BCM 进化模型已经被用于时空模式识别，比如人类行为探测³²。仿真结果表明，GRN-BCM 模型在进行时空模式识别时，比普遍使用的机器学习模型（如支持向量机或前馈神经网络）更加有效，此外，这种模型

仅使用空间特性，这与绝大多数机器学习模型同时需要时空特性不同。

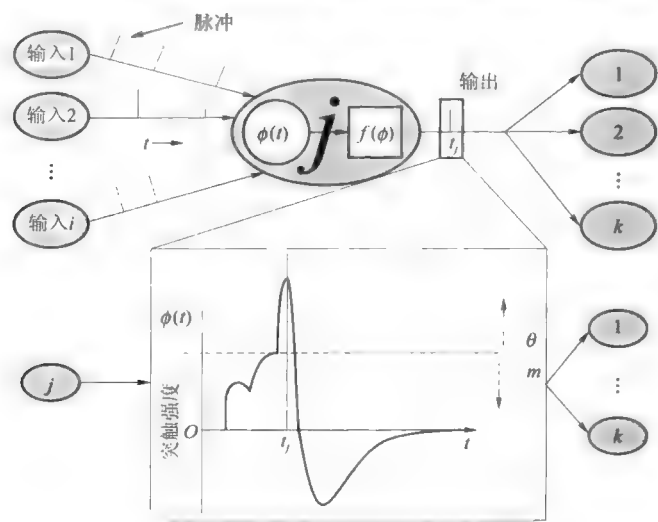


图 11 BCM 脉冲神经网络模型示意

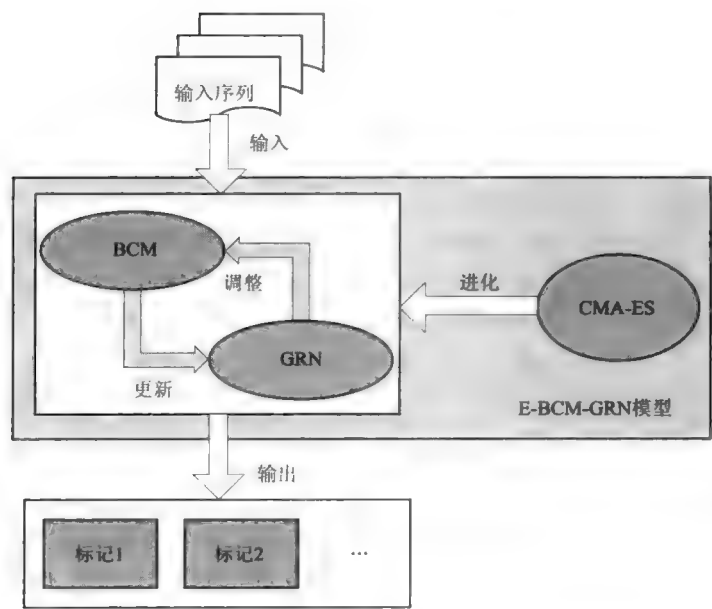


图 12 E-GRN-BCM 结构的说明，其中 GRN 的表达水平调控 BCM 中神经网络的可塑性参数，同时，基因表达水平受到神经细胞活性的影响，在得出 GRN 模型中参数时应用了进化算法

6 关于进化发育机器人学 (Evo-Devo-Robo)

从第一节的讨论中我们发现,在机器人技术中存在几种不同的但相互关联的研究路线,这在我们看来可以分为两类,即进化机器人学^[46],它包括共同进化机器人学^[45]和竞争性协同进化机器人学^[8],以及发育机器人学^[28],它包括在本章讨论的机器人的形态形成方法中。这里存在一个很自然的问题是,进化机器人学和发育机器人学之间存在怎样的关系?

就像在文献[24]中提出的观点,生命系统具有三种主要的适应机制,即学习、发育和进化。在仿生硬件系统的内容中,Sipper等人^[52]针对自然适应性的一个部分,即渐成说、个体发育学和系统发育学,提出了如何将它们组合在一个统一的框架内的完美观点,这也被称为POE模型。下面我们将从机器人的观点讨论这些机制。

- 渐成说 渐成说可以定义为通过感觉动作适应、自我探索、模仿、估测和社交,进行自主的、定期渐增的和开放式的学习,它是渐成机器人学的主要内容。所以,渐成机器人学强调对神经系统发育的模仿。

- 个体发育/形态形成 个体发育(个体发育学)包括细胞生长、细胞分化和形态形成,考虑到个体发育机器人学已经可与渐成机器人学交换应用,以及形态形成的许多计算模型同样包括细胞分化,我们提出将形态形成机器人学用于涉及机体物理发育的内容,包括神经系统发育。相比于渐成机器人学,形态形成机器人学涵盖了生命系统的物理发育。

- 系统发育学。在生物学中,系统发育学是指与不同物种和种群相关的进化机制。在机器人学中,进化已经成为机器人通过比如突变、交叉和基因复制等的基因变异能够适应较大环境变化的有力工具。

很明显,对渐成机器人学、形态形成机器人学和进化机器人学的研究并不能相互隔离地进行。第一,如果没有内部激励系统^[42]和由基因相连的神经结构用于预报、预测和记忆,就不可能有自主神经系统发育。对于渐成机器人学,内部激励系统迄今通常是预定义的。我们假定这种内部激励系统最基本的组成部分是由进化来赋予的。第二,机器人的机体设计是形态发育的结果,以此为基础的神经系统的发育是通过与环境的相互作用实现的,特别地,活动依存性和活动无关的神经网络发育紧密地耦合在一起,这表明渐成机器人学和形态机器人学之间的协同是不可缺少的。第三,发育并不只倾向于进化的方向,还会倾向于增强进化能力^[22],而且学习也能够影响进化^[14]。例如,有资料表明^[43],在不断变化的环境中,学

习有助于遗传多样性,而且进化能够在分配进化和学习所需的适应性资源中找到最优的平衡点^[44]。

进化发育生物学使我们对生物体形态和神经系统的发育有了革命性的认识^[37],而且,evo-devo方法同样帮助我们获得了对人类认知发育的更加深入的了解,从而导致一种新的理论的形成,我们称这种理论为进化发育心理学^[11]。

总之,我们相信进化机器人学和发育机器人学这两种机器人学中截然不同但又相互补充的理论也将会相互融合并形成一种新的理论:进化发育机器人学(evo-devo-robo)。

7 结论

本章介绍了一种自组织机器人系统的形态形成方法,这种方法致力于应用生物形态形成中的遗传和细胞机制开发自组织、自重构和自适应的机器人系统,涵盖了较广范围的机器人系统,比如群机器人系统、模块化机器人和智能机器人。渐成机器人学关注机器人系统的认知发育,而形态形成机器人学则聚焦于机体和神经系统的生长过程。所以,我们相信形态形成机器人学是渐成机器人学的有益补充,并且填补了渐成机器人学和发育机器人学之间的空白,因为发育机器人学不仅应当包括神经系统和形态的发育,还应当包括认知的发育。我们同样希望从形态形成机器人学和渐成机器人学的相互协同中受益,因为神经系统和形态的发育为认知的发育打下了神经-心理方面的基础。最后,我们提议该学科从发育机器人学进入进化发育机器人学,这样就可以在机器人系统中系统地嵌入自然智能的三种主要的适应机制,即进化、发育和学习。

致谢

作者要衷心感谢 Hongliang Guo、Yuyang Zhang、Jun Yin、Matthew Conforth 和 Lisa Schramm 提供了本章的说明性实例。

参考文献

- [1] Ashe, H. L., Briscoe, J.: The interpretation of morphogen gradients. *Development* 133, 385–394 (2007)
- [2] Belousov, L. V.: Integrating self-organization theory into an advanced course on morpho-

- genesis at Moscow State University. *Int. J. Dev. Biol.* 47, 177 – 181 (2003)
- [3] Ben-Amor, H. , Cadau, S. , Elena, A. , Dhouailly, D. , Demongeot, J. : Regulatory networks analysis: Robustness in morphogenesis. In: 2009 Int. Conf. on Advanced Information Networking and Application Workshops, Bradford, UK, pp. 924 – 928 (2009)
 - [4] Bienenstock, E. L. , Cooper, L. N. , Munro, P. W. : Theory for the development of neuron selectivity: orientation specificity and binocular interaction in visual cortex. *The Journal of Neuroscience* 2 (1), 32 – 48 (1982)
 - [5] Bishop, C. D. , Erezylmaz, D. F. , Flatt, T. , Georgiou, C. D. , Hadfield, M. G. , Heyland, A. , Hodin, J. , Jacobs, M. W. , Maslakova, S. A. , Pires, A. , Reitzel, A. M. , Santagata, S. , Tanaka, K. , Youson, J. H. : What is metamorphosis? *Integrative and Comparative Biology* 46, 655 – 661 (2006)
 - [6] Cohen, D. J. , Cicchetti, D. : *Developmental Neuroscience*. Wiley, Chichester (2006)
 - [7] Flavell, S. , Greenberg, M. E. : Signaling mechanisms linking neuronal activity to gene expression and plasticity of the nervous system. *Annual Review of Neuroscience* 31, 563 – 590 (2008)
 - [8] Floreano, D. , Nolfi, S. , Mondana, F. : Competitive co-evolutionary robotics: from theory to practice. *From Animal to Animats* 5, 515 – 525 (1998)
 - [9] Gilbert, S. F. : *Developmental Biology*. Sinauer Associates (2003)
 - [10] Gilbert, S. F. : The morphogenesis of evolutionary developmental biology. *Int. Journal of Developmental Biology* 47, 467 – 477 (2003)
 - [11] Griffiths, P. E. : Evo-devo meets the mind: Towards a developmental evolutionary psychology. In: Sanson, R. , Brandon, R. N. (eds.) *Integrating Development and Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge (2007)
 - [12] Guo, H. , Jin, Y. , Meng, Y. : A framework for self-organized multi-robot pattern formation and boundary coverage inspired from morphogenesis. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* (2010) (accepted)
 - [13] Guo, H. , Meng, Y. , Jin, Y. : A cellular mechanism for multi-robot construction via evolutionary multi-objective optimization of a gene regulatory network. *BioSystems* 98 (3), 193 – 203 (2009)
 - [14] Hinton, G. E. , Nowlan, S. J. : How learning can guide evolution. *Complex Systems* 1, 495 – 502 (1987)
 - [15] Hornby, G. S. , Pollack, J. B. : Creating high-level components with a generative representation for body-brain evolution. *Artificial Life* 8, 223 – 246 (2002)
 - [16] Hsieh, M. A. , Kumar, V. : Pattern generation with multiple robots. In: *International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Press, Los Alamitos (2006)
 - [17] Jin, Y. : *Morphogenetic robotics* (2010), http://en.wikipedia.org/wiki/~Morphogenetic_robotics
 - [18] Jin, Y. , Guo, H. , Meng, Y. : Robustness analysis and failure recovery of a bio-in-

- spired self-organizing multi-robot system. In: Third IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-organizing Systems, pp. 154 – 164. IEEE Press, Los Alamitos (2009)
- [19] Jin, Y. , Guo, H. , Meng, Y. : A hierarchical gene regulatory network model for adaptive pattern formation in changing environment. IEEE Transactions on Robotics (submitted 2011)
- [20] Jin, Y. , Meng, Y. : Morphogenetic robotics: An emerging new field in developmental robotics. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Reviews and Applications (2010) (accepted)
- [21] Jin, Y. , Schramm, L. , Sendhoff, B. : A gene regulatory model for the development of primitive nervous systems. In: Köppen, M. , Kasabov, N. , Coughill, G. (eds.) ICOPINIP 2008. LNCS, vol. 5506, pp. 48 – 55. Springer, Heidelberg (2009)
- [22] Jin, Y. , Trommler, J. : A fitness-independent evolvability measure for evolutionary developmental systems. In: IEEE Symposium on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (2010) (accepted)
- [23] Kalat, J. W. : Biological Psychology. Wadsworth Publishing, Belmont (2008)
- [24] Kodjabachian, J. , Meyer, J. -A. : Development, learning and evolution in animats. In: From Perception to Action. IEEE Press, New York (1994)
- [25] Komosinski, M. , Ulatowski, S. : Framsticks: Towards a simulation of a nature-like world, creatures and evolution. In: European Conference on Artificial Life, pp. 261 – 265 (1999)
- [26] Lee, J. A. , Sitte, J. : Morphogenetic evolvable hardware controllers for robot walking. In: 2nd International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment (February 2003)
- [27] Lee, P. N. , Kumburegama, S. , Marlow, H. Q. , Martindale, M. Q. , Wikramanayake, A. H. : Asymmetric developmental potential along the animal-vegetal axis in the anthozoan cnidarian, *nematostella vectensis*, is mediated by dishevelled. Developmental Biology 310 (1), 169 – 186 (2007)
- [28] Lungarella, M. , Metta, G. , Pfeifer, R. , Sandini, G. : Developmental robotics: A survey. Connection Sciences 15, 151 – 190 (2003)
- [29] Mamei, M. , Vasirani, M. , Zambonelli, M. : Experiments in morphogenesis in swarms of simple mobile robot. Applied Artificial Life 18, 903 – 919 (2004)
- [30] Meiner, D. : Swarm robotics algorithm: A survey. Technical report, University of Maryland (May 2007)
- [31] Meng, Y. , Guo, H. , Jin, Y. : A morphogenetic approach to flexible and robust shape formation for swarm robotic systems. Robotics and Autonomous Systems (2010) (submitted)
- [32] Meng, Y. , Jin, Y. , Yin, J. , Conforth, M. : Human activity detection using spiking

- neural networks regulated by a gene regulatory network. In: International Joint Conference on Neural Networks, pp. 2232 – 2237 (2010)
- [33] Meng, Y. , Zhang, Y. , Jin, Y. : A morphogenetic approach to self-reconfigurable modular robots using a hybrid hierarchical gene regulatory network. In: 12th International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems (ALIFE XII) , pp. 765 – 772 (2010)
- [34] Meng, Y. , Zhang, Y. , Jin, Y. : Autonomous self-reconfiguration of modular robots using a hierarchical mechanochemical mode. IEEE Computational Intelligence Magazine 6 (1) , 43 – 54 (2011)
- [35] Meng, Y. , Zhang, Y. , Sampath, A. , Jin, Y. , Sendhoff, B. : Cross-ball: a new morphogenetic self-reconfigurable modular robot. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (accepted 2011)
- [36] Mjolsness, E. , Sharp, D. H. , Reinitz, J. : A connectionist model of development. Journal of Theoretical Biology 52, 429 – 453 (1991)
- [37] Müller, G. B. : Evo-devo: extending the evolutionary synthesis. Nature Review Genetics, 943 – 949 (2007)
- [38] Murata, S. , Kakomura, K. , Kurokawa, H. : Toward a scalable modular robotic system- navigation, docking, and integration of M-TRAN. IEEE Robotics & Automation Magazine 14, 56 – 63 (2008)
- [39] Murata, S. , Kurokawa, H. : Self-reconfigurable robots. IEEE Robotics & Automation Magazine, 71 – 78 (March 2007)
- [40] Mytilinaios, E. , Marcus, D. , Desnoyer, M. , Lipson, H. : Designed and evolved blueprints for physical artificial life. In: Ninth Int. Conf. Artificial Life (ALIFE IX) , pp. 15 – 20 (2004)
- [41] Oudeyer, P. -Y. , Kaplan, F. : How can we define intrinsic motivation? In: Proceedings of the 8th International Conference on Epigenetic Robotics. LUCS, Brighton (2008)
- [42] Oudeyer, P. -Y. , Kaplan, F. , Hafner, V. V. : Intrinsic motivation systems for autonomous mental development. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 11 (1) , 265 – 286 (2007)
- [43] Paenke, I. , Branke, J. , Jin, Y. : On the influence of phenotype plasticity on genotype diversity. In: 2007 IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence, pp. 33 – 40. IEEE Press, Los Alamitos (2007)
- [44] Paenke, I. , Jin, Y. , Branke, J. : Balancing population and individual level of adaptation in changing environments. Adaptive Behavior 17 (2) , 153 – 174 (2009)
- [45] Pollack, J. , Lipson, H. , Funes, P. , Ficici, S. , Hornby, G. : Coevolutionary robotics. In: Evolvable Hardware, pp. 208 – 216 (1999)
- [46] Nolfi, S. , Floreano, D. : Evolutionary Robotics. The MIT Press, Cambridge (2004)
- [47] Sanes, D. H. , Reh, T. A. , Harris, W. A. : Development of Nervous Systems, 2nd edn.

Academic Press, London (2006)

- [48] Schramm, L. , Jin, Y. , Sendhoff, B. : Emerged coupling of motor control and morphological development in evolution of multi-cellular animates. In: 10th European Conference on Artificial Life (2009)
- [49] Shen, W. , Will, P. , Galstyan, A. : Hormone-inspired self-organization and distributed control of robotic swarms. *Autonomous Robots* 17, 93 – 105 (2004)
- [50] Simons, K. , Karsenti, E. , St Johnston, D. , Wijer, C. , Swaminathan, S. (eds.) : *Self-Organization and Morphogenesis in Biological Systems*, Schloss Ringberg, Tegernsee, Germany (December 2006)
- [51] Sims, K. : Evolving 3D morphology and behavior by competition. *Artificial Life* 1 (1994)
- [52] Sipper, M. , Sanchez, E. , mange, D. , Tomassini, M. , Perez-Urbe, A. , Stuffer, A. : A phylogenetic, ontogenetic, and epigenetic view of bio-inspired hardware systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1 (1) , 83 – 97 (1997)
- [53] Stanley, K. O. , Miikkulainen, R. : A taxonomy for artificial embryogeny. *Artificial Life*, 93 – 130 (2003)
- [54] Taylor, T. , Massey, C. : Recent developments in the evolution of morphologies and controllers for physically simulated creatures. *Artificial Life* 7 (1) , 77 – 87 (2001)
- [55] Wolpert, L. : *Principles of Development*. Oxford University Press, Oxford (2002)
- [56] Yu, C. -H. , Haller, K. , Ingber, D. , Nagpal, R. : Morpho: A self-deformable modular robot inspired by cellular structure. In: *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3571 – 3578. IEEE Press, Los Alamitos (2008)

第二章 如何设计机器人机体和机器人群？ ——具身自组织系统中的仿生、 拟生和人工进化

Thomas Schmickl

格拉茨大学生态系人工生命实验室，奥地利，格拉茨，大学广场2号，
8010

e-mail: thomas.schmickl@uni-graz.at

本研究工作受到如下资金的资助：EU-IST-FET ‘SYMBRION’，no. 216342；EU-ICT ‘REPLICATOR’，no. 216240；EU-IST FET ‘I-SWARM’，no. 507006；FWF（奥地利科学基金），no. P19478 – B16。

摘要：在由自主具身体（比如机器人）组成的大规模系统中，不可预测的事件、传感器噪声和执行器误差等，都会对控制软件的设计者提出重大挑战。如果这种系统趋向于自组织，则经典的工程分析方法本身不能用来处理其中的突发现象。最近几年，格拉茨大学人工生命实验室研究了许多种用于多模块机器人和群机器人的控制算法的综合方法，这些方法有的是将生物学原理直接转移至工程领域（仿生、拟生），还有的是从零开始的通过人工进化生成的控制器。本文首先讨论了分布式控制算法，它们决定着自主机器人群的集体行为，这些算法由蜜蜂的集体行为和黏菌聚集模型推导而来，其中一个算法模仿了蜂群中成年蜂之间的食物交换（“交哺现象”），另一个算法则是从黏菌中的化学信号传递中得到。除了对机器人群的控制，本文还提出了多模块机器人体系的控制模式，它们同样是以模仿机器人体系各部分之间的流体交换（激素）为基础的。在群和体系这两种领域中，其控制系统是自组织的，而且该控制系统由许多自我平衡的子系统组成，这些子系统能够在个体（模块）层面和集体（体系、群）层面上彼此适应。此外，本文还讨论了分布式反馈网络的重要性，以及集体机器人中仿生和拟生的优点和缺点。

1 介绍

虽然机器人工程领域在过去已经取得了很大的进步，但为机器人开发用于多种多样的动态或者有时是在不可预测的工作环境中的控制算法，仍然是一个挑战。而且当控制目标不只是一个单独的机器人单元，而是几个或者有时甚至是大量的机器人模块时，这一挑战将更令人感到艰难。

集体机器人学领域大致可分为两种方向：A. 群机器人学。机器人模块在控制和它们的物理连通性上具有完全的自主性。B. 多模块机器人学和可重构机器人学。机器人模块在物理上是相互耦合的。这两种方向上的系统可认为具有极大的相似性，只是在两种方向中，不同系统在模块间的（物理）连通程度不同。所以群的“非常松弛的耦合”与体截然不同，换句话说，体是相互之间紧密连接的模块群。在格拉茨（奥地利）的人工生命实验室里，我们从自然群系统和简单的多细胞生物体中获得仿生灵感，然后将控制自然系统自组织行为的基本原理翻译为算法来在机器人系统中产生大量的自组织行为。但由于“基底”发生了较大的变化，这种翻译过程必须精心考虑技术目标系统的可行性和局限性。图1中给出了生物学研究领域和工程研究领域之间的潜在“灵感源”，这也与我们研究组的研究模型相关。

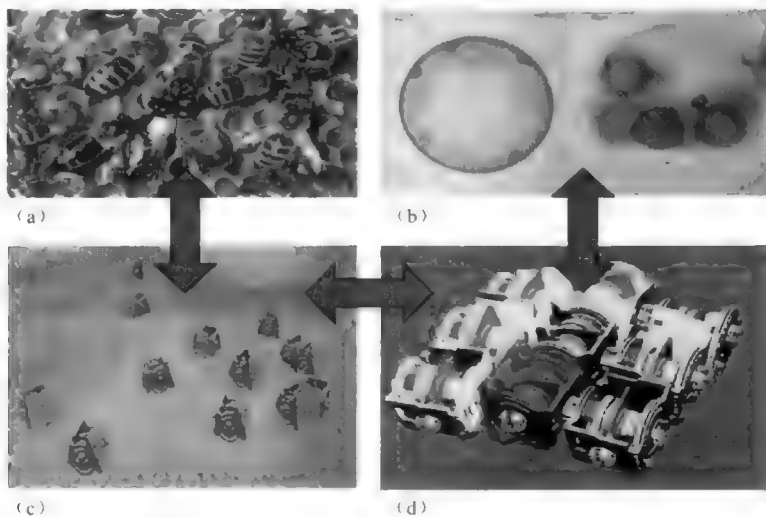


图1 群机器人和多细胞机器人体的灵感源。箭头表示一个领域中的知识如何潜在地影响另一个领域中的研究。图(b)中的“团藻”由Ralf Wagner博士提供，来自“维基共享资源库”（见书后p.3彩图1）

在对生物学感兴趣的工程师的共性认识中,经常将“拟生”一词和“仿生”按相同意思使用,但我认为在这两种研究领域之间存在较大的区别:在仿生领域中,其基本原理是从生物灵感源引入至技术目标系统中的,其中的生物机制经常是一种化学机制或者是行为机制,并将这种生物机制转换为一种能够反映这种灵感关键点的算法,突出的例子比如遗传算法或进化策略^[22, 12]、粒子群优化^[14]或蚁群优化^[7]。尽管这些算法和方法很明显地反映了生物学中对应物的关键特性,但是非常抽象空洞,并且没有将任何生物学约束引入到技术世界中,所以它们与生物学中对应物的功能相仿,但并不类似。相比之下,在“拟生”研究领域中,工程师试图尽可能地复制生物系统的外表,例如:现代类人机器人的步态可能看起来与人的步行相似,但它们的步行是通过伺服电动机、液压传动装置和相似的原理来实现的,这与生物学中与步行相关的机制一点也不同。所以,在“拟生”领域中,产品在外形上与生物实例相似,但却是以不同的方式运行。然而,也有许多这样的实例——它们从两个方面得到解决一种工程问题的方法,这就同时用到“仿生”和“拟生”的方法。我认为这些方法就是典型的人工生命的方法,因为用这种方法得到的产品将与生物体无法区分:它的作用和外形都将与自然生物体相似。生命形式的再创造是人工生命的基本目标,所以,100%成功率的“仿生”和“拟生”将会引发这样一个技术奇点:第一种人造生命形式。

本章简要地总结了如何使用仿生方法控制机器人和机器人系统,这就意味着完成的控制软件在功能上类似于相应的自然系统中已知的控制机制。当然,完成这种从自然领域到人工领域的转化还需要对其进行抽象化,这是一个关键的问题,因为控制机制变得越是抽象,自然系统和人工系统之间的关联就越少,这也意味着高度抽象化会阻碍未来生物学研究中灵感的产生,将生物学和工程之间潜在的共生关系转化得更像一种寄生关系。为了避免使我们的研究陷入这种知识流的单向流动,我们在每一次仿生的灵感出现后都会继续我们的生物学研究,通过并行地进行“拟生”型的研究工作,我们的研究组也尝试着将工程上的成功案例转化为生物学中的相关研究主题。

另一个产生机器人和机器人系统控制软件的方法是开放式进化,这种方法在我们实验室的项目 SYMBRION 和 REPLICATOR 中经常用到^[16, 38, 23],而且我们在这种方法中应用了一种仿生的多体(也称为图灵实现)控制系统,该控制系统受到人工进化算法的控制。这就表示并行地对生物灵感进行了三次组合:生物学中众所周知的形态、控制(生理学)和选择,它们

是我们自动产生机器人控制器、机体外形和相互作用模式的方法中重要的方面。本文对上面提到的两种主要的科学方法以案例研究的形式进行了叙述。

本文最后的讨论将总结文中所叙述的“拟生/仿生”特征空间中的方法和设计的相对地位，并讨论这些研究路线与人工生命的基本技术奇点如此接近。

2 群机器人学中的仿生和拟生

2.1 仿生

仿生的目的是通过查看类似的自然系统来寻找问题的答案，在该自然系统中的自然选择已经促成了生物体基因、形态或生理的变异，从而可以用来解决特定的问题。就像上面叙述的一样，在我们的分析中，仿生的目的不是产生这些生物系统的技术复制品，而是认识主要的生物系统是何或者如何以一个有效的方式运行的。在回答了这些问题后，我们使用类似的方法开发了一种在技术实体中有效的机制，并给出了相似的控制规则。我们的研究组对我们认为可作为灵感源的动物进行了实验室试验，然后用数学模型抽象化和分析其中的关键机制，并进行仿真研究，以识别实际工作中合适的简化模型和自然灵感的简化模型。根据这些模型，搭建了机器人控制器和合适的机器人场地设置，它们是将所观察到的自然机制的算法核心转化为机器人算法的主要“转移过程”。在其他的研究中，建立了描绘机器人装置的模型和仿真工具，有了它们，就可以在机器人系统上进行参数优化和进化计算。此时，研究已经在多种层次上进行了研究，使用的多种工具有：真实动物实验和机器人实验，生物实体和机器人系统的仿真。

仿生机器人系统在起初通常能够定性地产出与自然系统相似的行为特性，但我们经常会在机器人的集体行为中观察到降低的效率和多余的相反作用，这是因为从生物中简单地转移至技术领域中的特性和机制通常是次优的。为了弥补这一缺陷，我们进行了另外的实验、建模和计算参数优化。当所感兴趣的某些自然系统中的行为特性已经被深入地研究并在已有的文献中进行了叙述，则这种情况下的生物系统将不会在我们的实验室内被加以研究。

我们已经根据生物灵感为群机器人开发了一整套仿生控制算法：基于

矢量的算法^[40]、仿黏菌的算法^[26]、交哺行为启发算法^[30, 27]，以及 BEE-CLUST 算法^[31]。下面将通过对这些算法进行叙述，来说明在不同层次的细节上自然界如何启发机器人算法。

2.1.1 群算法的一种标准检查程序场景

为了比较这些算法并调节群算法的性能，有必要开发实际的标准检查程序。在 EU IST-FET FP6 “I-Swarm” 项目中，设计了两种类型的机器人：小的三腿 I-Swarm 机器人，它们与四个指向四种方向的 LED 灯（光束间夹角 90° ）保持通信，和 Jasmine 机器人（两轮，六个夹角为 60° 的 LED 灯）进行通信。I-Swarm 机器人能够使用静电杆拾起微小尘粒，同样，Jasmine 机器人在起初设计时安装有一个磁夹具。有了这些硬件平台，我们还开发了一种由集体方法进行搜索的场景：搜索灰尘，即集体清洁。自主机器人群在场地内随机分布，所有的机器人起初都无载运行。同时在场内指定“卸载”区，卸载区内的单独堆积尘粒都应当是由机器人卸载的，这些尘粒初始时被置于指定的“灰尘”区，而灰尘区必须由机器人自行发现。这是一个困难的工作，因为机器人没有可以从一定距离外报告灰尘或卸载的传感器，它们只能观察到直接位于它们下方的场地地面。此外，与其他机器人的通信和障碍探测也只限于机器人周围较近的距离内（1~2 个机器人直径）。

集体任务为：机器人必须以有效的方式共同探索场地。某些机器人发现灰尘区域后，它们必须吸引其他机器人到这些区域，同时以有效的方式拾起尘粒并将它们搬运至卸载区。这就包含一种“寻找最短路径”的任务，而且该任务应当由集体共同解决。这种场景的优点是具有明显的测量高效性，例如：在 y 时间步长内由 x 机器人搬运的尘粒为多少？这种集体任务的“难度”可通过增加灰尘区和卸载区之间的距离或者在路线上设置障碍来调整。有了这一标准检查程序，我们就能够比较不同的群算法，此外，它还使我们能够研究重要的群特性，比如临界的最小群密度。

下面将叙述四种不同的群算法，开始介绍通信扩展策略，即技术上的“基于矢量的”策略。这种策略几乎没有仿生内容，它几乎是一种解决所提出的一系列问题的经典工程方法。第二种算法是“交哺行为启发”的算法，它仍然需要大量的通信（几个浮点数），它模仿的是昆虫群落中成年昆虫间的喂食现象。第三种算法是“黏菌”算法，它对通信的要求程度较低，只需要少量的信号进行交换。最后一种是

“BEECLUST”算法，它几乎不需要通信，但在使用这种算法的群中没有观察到机器人的纵队队形，这种算法在另一个作为上述清洁场景子场景的汇聚场景中被加以研究。

2.1.2 基于矢量的算法

我们将所研究的第一种算法称为“基于矢量的算法”，因为它基于机器人间矢量信息的通信和集体矢量求和。几种出版物^[40, 6]中已经对其进行了分析，下面仅对其进行简要的介绍。使用这种算法，以随机搜索方式偶然发现目标（灰尘区或卸载区）的机器人开启其二进制信号，该信号用于向附近的其他机器人指明目标的位置。这些接收到信号的机器人现在就能够计算它们的当前方位与发信号机器人间的夹角，随后开启另一个二进制信号并将计算得到的角信息发送给附近其他机器人。这样就使得其他机器人有可能进行矢量计算，因为通过其 LED 灯发信息的机器人同时也将发信息 LED 灯的方向编码至信息内。用这种方法，接收信号的机器人就可以猜测其他机器人的相对方位，以及发信号机器人的方位与正在搜索的目标之间的通信角度。这种信息通过矢量相加在整个群内传递，完美地将它们朝向目标的方向告诉给所有的机器人。

图 2（a）中通过仿真预测了将尘粒从灰尘区输送至卸载区的群机器人的纵队队形。使用标准检查程序，我们还分析了群尺寸（密度）对群的几种重要效率测试结果的影响（见图 2（b））。但我们发现了这种算法的许多缺点：当在机器人-机器人的通信和角度测量中加入噪声时，由这种噪声引起的误差逐步累加，且最后削弱了群的性能。该算法的另一个缺点是，我们观察到通信矢量通常直接指向搜索的目标，即使有障碍将路线阻挡时也是这样，这将削弱机器人避开这种障碍的能力。第三个缺点是旧的，也就是过时的信息将一直存在于系统中，这会阻碍群及时对环境变化做出反应。我们也曾试图使用跳跃总数方法确定通信矢量的“寿命”来解决这些问题，该方法中只允许机器人接受比它们现在所拥有的信息更新的信息。但即使经过这种改进，也没有得到所期望的群行为的性能和稳健性。所以，我们开始寻找对噪声更稳健的并只需较小通信带宽的群算法。自然选择使得自然系统成为有效且稳健的结构，因此我们计划基于此来增加仿生的水平，这可以从下文描述的算法看出。

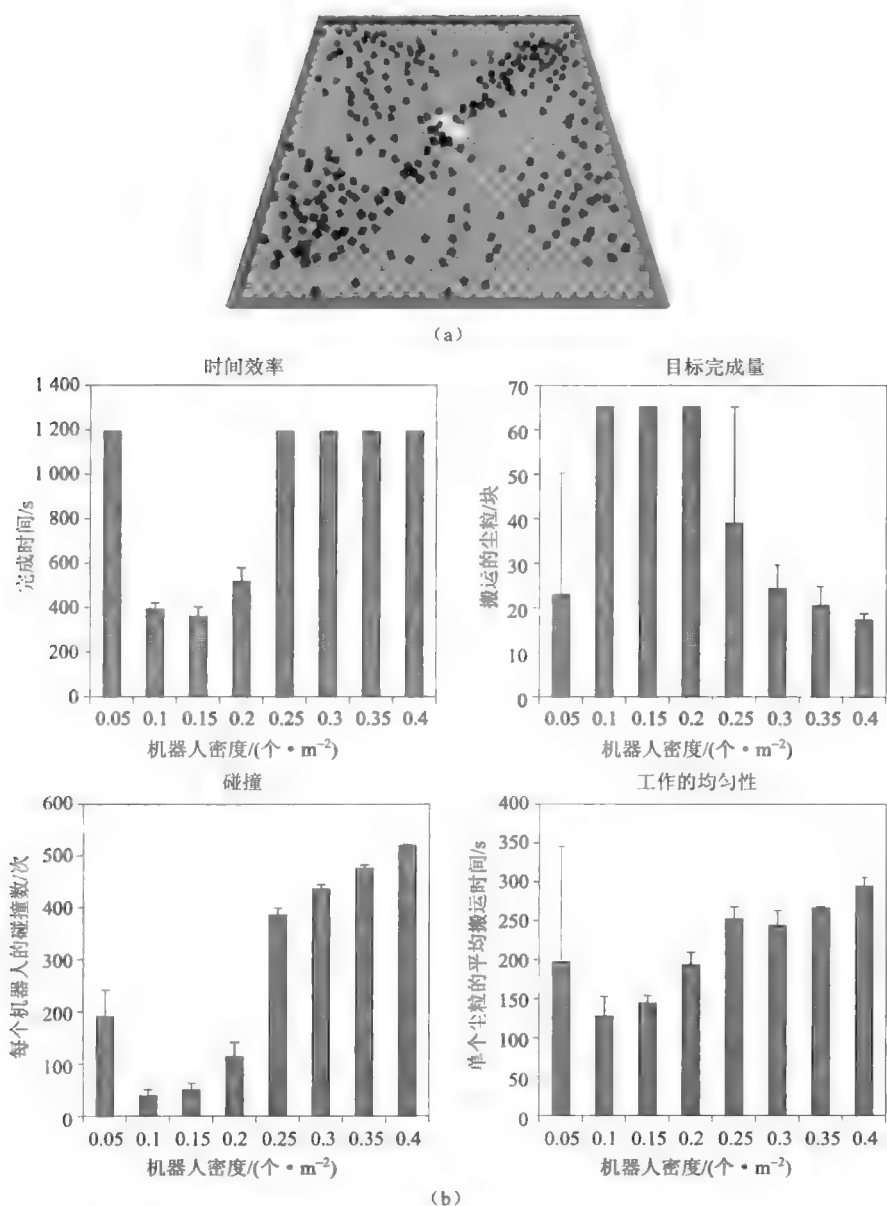


图2 图(a)是清洁场景中出现的运输队形。有载机器人(黑色箱体)搬运着它们的尘粒位于从灰尘区(深灰色地板)至中心卸载区(浅灰色地板)的最短路径上。无载机器人(灰色箱体)通过矢量通信帮助导航。图(b)是几种效率测量对群密度的依赖性分析。我们很明显地发现了群机器人的一个最佳密度(尺寸)。图片来源于文献[6]

2.1.3 交哺行为启发的算法

与基于矢量的策略相比，这种算法不需要任何“矢量”计算，而矢量计算会引起群内的计算误差（由于噪声）累积。这里的算法不需要机器人具备较高的计算能力，但需要临近机器人间两位浮点数的信息通信。交哺行为启发的算法使用蜜蜂之间喂食花蜜的机制来调控机器人群的行为，它用来产生分布图，并用这种方法产生群的某种机体感知。应用这种分布式算法，机体可以通过增加或消耗它们内部存储器中的虚拟花蜜量来产生一种公共的梯度图，附近的机体随后应用这种公共的梯度图进行面向目标的导航。在前面所述的与群居昆虫的搜索任务类似的清洁场景中，一个虚拟花蜜源就是一个放置尘粒的地方，这些尘粒应当由机体拾起并送到卸载区，卸载区是另一个不同种类的虚拟花蜜源。就像蜜蜂一样，机体在移动时同样会消耗它们所载有的一部分虚拟花蜜，这就会导致旧信息的衰减。花蜜也可以用来与相邻的机体共享，就像群居昆虫的交哺行为一样。从这些局部有效的规则中可以看出，群内存在两个梯度，一个指向尘粒，另一个指向卸载区。图3可视化了

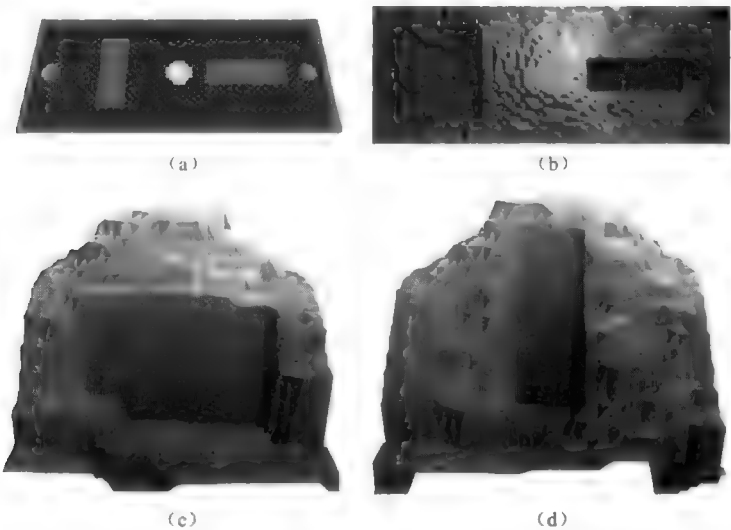


图3 使用交哺行为启发算法的机器人群的仿真 图(a)是清洁场景中花蜜设置的截图：机器人(红色)试图发现两尘粒区(蓝色)到中心卸载区(黄色)的最短路径。路径被两个壁面(灰色)阻碍。图(b)是指向卸载区的梯度的俯视图。图(c)是从左侧观察的相同梯度的侧视图。图(d)是从右侧观察的相同梯度的侧视图。图片来源于文献[30](见书后p.4彩图3)

一种共享集体图，在所描述的场景中，我们在环境中设置了墙壁，它可以组织机器人移动和机器人通信，共享图中也明显地反映了这一点。

交哺行为启发的算法基于三个重要的特点：A. 正反馈（具身体的梯度或向上的移动）将机器人吸引至目标位置。B. 负反馈（花蜜的消耗）避免了过度拥挤并将过时的信息从系统中移去。C. 类似于交哺行为的通信导致信息在群内扩散，通过调整突然出现的梯度图来增强对环境波动的集体适应性。大致来说，共享的梯度图动态地编码了那些局部的稳定状态，这些稳定状态是单个机体的行为以及机体与邻近机体之间或者与环境之间的相互作用进行自我平衡的结果。所以，多层次分布和基于行为的自我平衡是这种群算法的关键部分。

2.1.4 黏菌算法

黏菌算法^[26]是一种能够减小所需的通信量但同时还能产生与上述两种算法相当的集体行为的算法，它模仿的是盘基网柄菌这种黏菌物种中变形虫的聚集行为。在这种算法中，那些由于自身基本的随机运动而碰巧处于灰尘区或卸载区的机器人都会释放出信号，在我们所有的群算法中未指明行为的机器人都在进行着这种基本的随机运动。局部邻近的机器人感知所释放的二进制信号并反过来释放一个相似的信号，随后转入一定时间的暂停工作状态（不应期），在该时间段内它们不对任何信号做出响应。这种连锁反应存在于自然界中的许多实例中，通常被称为“激励介质”。在黏菌模型中，那些想要聚集的变形虫频繁地发出一种化学激励物，像萤火虫即使在足球场中也能发出光信号一样，使用类似的机制产生了“Laola”波。在我们的机器人群中，可以观察到闪烁的波在整个群内传播，导致由灰尘区和卸载区释放的脉冲波。每个机器人根据它当前是处于装载还是未装载状态，将它们的头部转向指示灰尘区的波或者转向指示卸载区的波，这样它们就被导向搜索目标。由其他相关领域中的知识可知，这种波可以产生许多有意义的特性：它们能够自动回避障碍物，而且当这种波相遇时，它们能够相互抵消，从而使其成为这样的系统：如果从起点到目标点有多种方式，则只发生与最短路径相一致的波传播，因为在较长的路径上有相遇的波并且相互抵消。这就使得我们的机器人群总是能够发现从灰尘区到卸载区的最短路径，如图4所示。

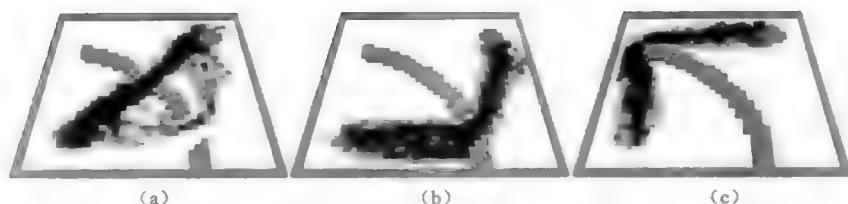


图4 使用黏菌启发算法的机器人群的模拟 图中显示了负载机器人从场地左下角灰尘区至场地右上角卸载区的累积路径 图(a)中, 机器人群选择穿过障碍物中心出口的最短路径, 只有一小部分机器人群选择了从灰尘区到卸载区稍长路径的第二个出口 图(b)中, 在中心出口关闭后, 机器人群自动选择了较低的出口, 该出口为当前的最短路径。图(c)中, 当这个出口也关闭后, 机器人群只能选择剩下的最长路径。图片来自文献[26]

2.1.5 蜂群算法

上述所有的算法都过度依赖于通信, 但在较大的群中有时很难建立这种通信, 所以我们开发了另一种群算法, 它几乎不需要明确的通信, 而且这种算法也是由模仿蜂群的行为而来。

群算法“蜂群”模仿的是幼蜂的聚集行为, 由此可以为机器人系统开发出一种非常简单、稳健而且具有柔性的聚集算法。这种算法的思想来源于对蜂巢中幼蜂的观察。在蜂巢内, 新出生的蜜蜂更喜欢大约 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度^[11], 这些幼蜂趋向于聚集在蜂巢中最热的中心区域。对单个幼蜂在温度梯度 ($30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$) 环境中的实验表明, 绝大多数蜜蜂并不能永久地将它们自身保持在最热的区域。事实上, 大多蜜蜂会漫无目的地徘徊, 经常在遇到温暖区域后不久又离开了 (见图5(a))。所以, 似乎可以用一种“蜂群效应”来解释蜂群的这种表现良好的集体“寻温”行为。进一步地使用专门场地的实验可有助于理解这种行为: 单个蜜蜂通常会在场地内随机地徘徊, 但遇到另一个蜜蜂时它会停止并在所停止的地方等待一段时间, 时间的长短与该地方的温度有关, 蜜蜂在低温时等待的时间较短, 高温时则等待时间较长。这样就在所有的场地上形成蜂群的聚集, 但这些蜂群在温暖区域的滞留时间要比在较冷区域的滞留时间长。最后, 所有的集群就会融入位于全局温度最优位置处的大的群中 (见图5(b)~图5(d))。

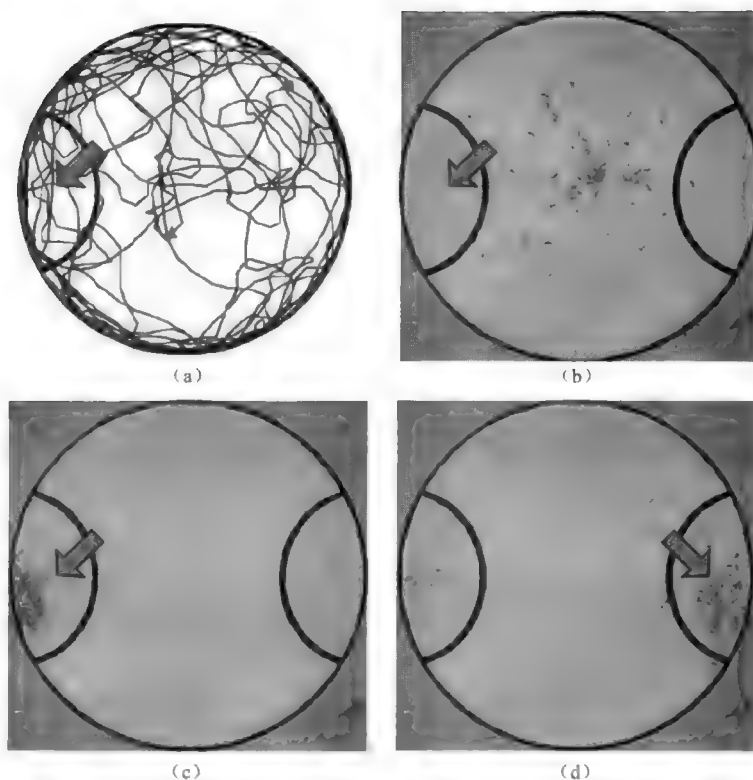


图5 特定场地中的蜂群实验。图(a)显示单个蜜蜂不会寻找到位于左边的 36°C 温度最优点,该位置由红色箭头指出;图(b)具有64个蜜蜂实验的初始状态, 36°C (全局)最优位置位于左边,由红色箭头指出, 32°C 的次优位置位于右边;图(c)显示蜂群聚集在最优位置;图(d)显示,当左边 36°C 的最优位置关闭时,蜜蜂能够再次聚集在右边 32°C (全局)的最优位置。环境温度约为 30°C

将幼蜂的这种行为抽象为一种算法(称为“蜂群聚集算法”),并用多原因模拟方法进行分析。仿真表明这种算法不仅能够将机器人聚集在一个感兴趣的区域,还能够使机器人区分不同特点的区域。而且这种算法同样允许机器人能够适应目标区域特性的变化

蜂群聚集算法将按照下面描述的规则在自主式机器人的微处理器中一条接一条地执行,或者是在其他(不包含)种类的机体中循环执行:

- ① 所有的机体直线移动并不断地检查是否发生了碰撞。
- ② 如果它们感应到碰撞,将会停止。
- ③ 如果碰撞发生在机体与障碍物之间而不是与另一个机体之间,机体

将绕过障碍物并继续执行步骤 1。

4 如果碰撞发生在机体与另一个机体之间, 则主机体将测量环境的局部特性, 该特性的值越高, 机体在该位置的等待时间也越长。

⑤ 在等待周期结束后, 机体回到步骤①继续执行。

在研究了蜂群算法的仿真后, 将其输入至群机器人中, 并将其修改为用于 Jasmine 机器人的光点搜索行为^[31]。在这些实验中, 用光强梯度代替我们在蜜蜂实验中使用的温度梯度, 因为 Jasmine 机器人含有一个亮度传感器, 而没有温度传感器。这些实验对机器人的硬件要求不高, 它们只需要能够避开碰撞, 能够从障碍物或墙壁中分辨出其他机器人, 并能够测量局部光亮度。

在我们的实验中, 执行蜂群算法的机器人群表现出与幼蜂行为类似的集体行为^[31]: 机器人能够在场地内最优地分布, 从而使得更多的机器人聚集在较亮的光点位置, 而只有较少的机器人聚集在较暗的光点位置。此外, 当这些不同的光点变化位置时, 机器人能够迅速地重新分布 (见图 6)

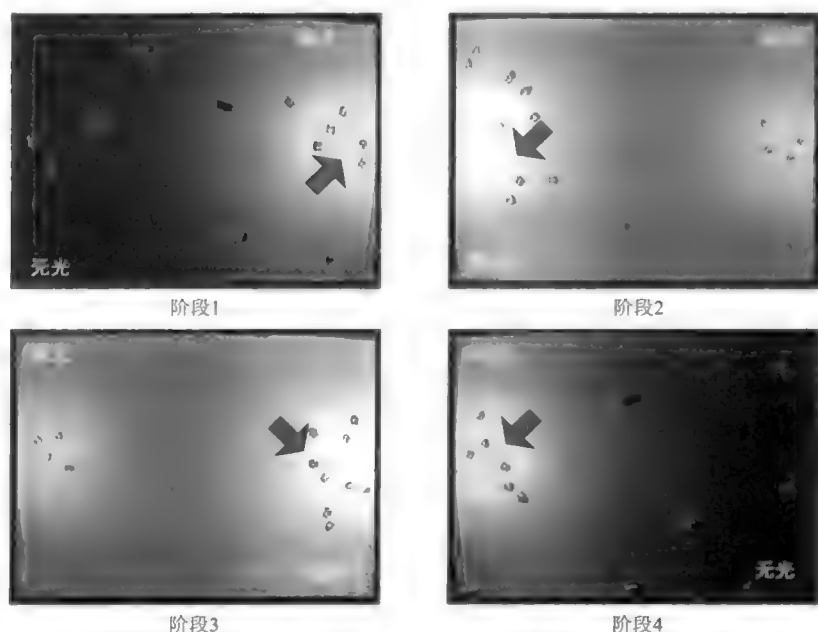


图 6 使用蜂群算法的实际群机器人实验的照片。箭头指示出全局最优位置。图片来自文献 [31]

2.2 群算法的进化适应性

运行仿生算法的机器人群通常只是定性地模仿，而与作为被模仿源的自然群系统相比，在定量上具有不同的行为。我们使用进化计算技术来有效优化我们的群算法²⁷，在这些研究中，群的关键参数（群密度、机器人速度、避免碰撞距离……）由进化参数²²来建模，而整个机器人群则是选择单元。所以，我们在一个群之间相互竞争的场景中测试了总体群。

2.3 拟生

与仿生过程相比，拟生过程成为技术实体（算法、机器人）的方法类似于相应的生物体，尽管它们在外形上酷似生物体，但在内部机制上不一定相同，而在绝大多数情况下，这将意味着它们与外部世界的接口（比如传感器和执行器）与所模仿的生物体源非常相似。这样，对实际生物体的理解将变得非常重要，因为拟生将迫使工程师或科学家“通过生物体的眼睛去认识世界”。虽然拟生系统与生物体的内部机制可能不同，但它们拥有的数据则与生物体可能认识到的数据相似，比如在仿生驱动中，运动规则最后必须转换成与生物界中所观察到的相近的方式。

2.3.1 蜂群算法的拟生

除了抽象模型和寻光的 Jasmine 群外，我们还研究了处于实际温度场中的蜂群算法，这里的温度场是一种激励方法，它能够引起自然界中蜂群的聚集。所以我们为 Hemisson 机器人（见图 7）设计了一个附加装置，它能够使机器人在温度梯度中确定前进方向。该附加装置由一组安装在两人工触角上的温度传感器组成，这与蜜蜂上的温度传感器的结构类似。我们将这种机器人称为“热机器人”。在空气中的热扩散、梯度的稳定性和测量的时间滞后上，热与光相比具有不同的物理特性，因此我们预计这一任务比在光梯度中的聚集更具挑战性。

在一温度梯度场中拥有三个机器人的实验表明，执行群智能蜂群算法的机器人与执行标准梯度提升算法的机器人相比具有更高的成功率。我们预计，使用更大的群将会进一步提升执行蜂群算法的成功率，这是因为更多的机器人会引起更多的碰撞，从而就会执行更多的测量。

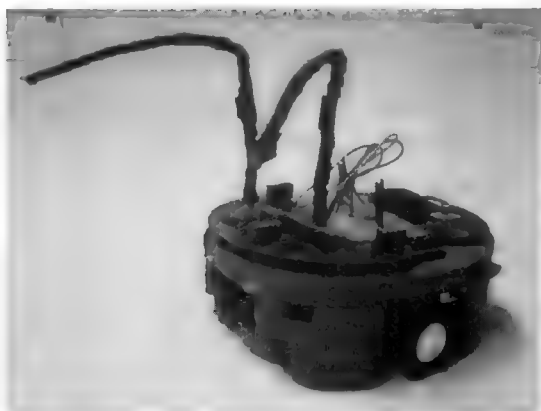


图7 热机器人：机器人“Hemisson”拥有附加的触角，用来支撑传感器，这些传感器用于测量局部温度

2.3.2 拟生蚁群信息素路径

蚂蚁使用信息素来有效地指导它们在潜在的食物源和下一个食物源之间的前进路线，我们在 ANTBOTS 项目^[18]中研究了这种特性。使用机器人模仿蚁群信息素路径铺设，有以下几种方法：

化学传感器和酒精放置机器人方法^[25]。这是对基于信息素的蚁群路径的一种非常实用的模仿方法，但这种方案中使用的化学传感器，以及机器人与比如酒精等物质的组合方式表现得并不可靠，所以这种方案实施性较差。

用笔和纸在地面上画线^[37]。在该场景中，每一个机器人上安装一支笔用来在地面上画出浅的实线。尽管可以使用一种特别种类的隐形墨水来实现这些遗留痕迹的淡出，但由这些机器人遗留下来的痕迹与机器人本身相比还是较浅，所以这种方法并不能提供对蚁群行为非常接近的模仿。

依靠热的遗留痕迹^[24]。这种方法提供了一种模仿蚁群觅食行为的非常柔性的方法，它通过在通常的表面比如地毯或瓷砖上的热的遗留痕迹来实现。这种方法存在的问题是，由于受到电池供电的限制，即使在较大的移动机器人上也不能实现由热产生电。于是研究人员采用固体石蜡的形式储热来铺设路线，但这将引起实验使用中其他的困难，并使得动态调整路径的强度变得不可能。

使用机器人追踪和投影装置，这种方法中的每一个机器人都可以使用安装在场地上方的摄像机进行追踪以铺设路径⁹。用计算机通过将这些路径投影在场地上，对“虚拟信息素”进行叠加。这一系统对机器人铺设和跟踪路径来说并不是一种完全自主的方式，它还需要中心单元和外部

计算机。但这种系统提供了一种非常柔性的方法，它可以修改信息素的参数，比如淡出和扩散。

向磷光涂层上发射紫外光，这样可以在场地地面上遗留下发出绿光的路径。这种模仿蚁群路径的方法在文献 [1] 中进行了应用。在该装置中，在场地地面上涂覆一层特别的发射磷光涂料，它在暗室内被外界紫外光源激励后会发光几分钟。在移动机器人上安装紫外 LED 灯，就可以在地面上留下发光路径。这样做的思想是，由于光亮度恒定的衰减速率，从地面上发出的绿光可看作是对蚁群在它们路径追踪中所使用信息素的蒸发的模拟。

我们的“蚁群机器人”通过扩展磷光图层的方法来模仿信息素路径，实验装置中我们使用了在 EPFL Lausanne² 上开发的电子冰球机器人，它拥有两个附加的板，用于路径铺设和导航至场地外的光源。通过向场地地板发射紫外光，机器人能够在场地地板上铺设路径。路径跟踪通过电子冰球机器人板上的摄像机来实现。为了引导回出发地，我们在场地的一个角落处使用六个光点二极管测量从一个光源发出的光强（太阳罗盘和太阳）。

我们使用单个机器人进行了几组实验，以便使用单个机器人重复进行路径铺设和跟踪循环来测试实验装置的可行性。在这些实验中，我们在场地中放置了安装有红色和蓝色 LED 灯的两个透明塑料外壳，它们分别表示出发点和食物源。机器人的任务是在两目标区域间其自身路线上多次重复地导引前进和后退。结果表明，我们新开发的传感器能在约 1.3 m 的距离上足够可靠地长期将机器人导引至两地点处（见图 8）。

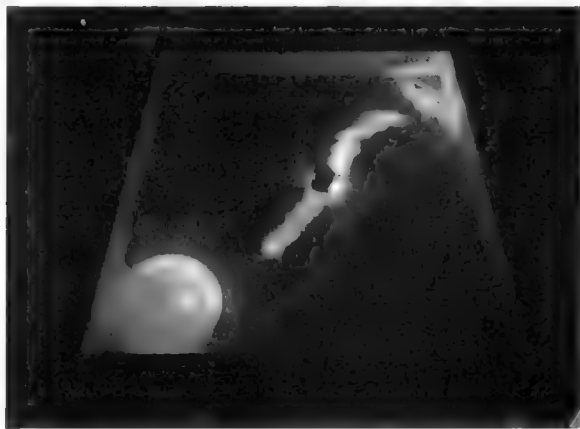


图 8 机器人在 1 m × 1 m 的场地中、食物源（右上方）和出发点（左下方）间 1.3 m 的距离上铺设的路径。图中的机器人正在从食物源指向出发点的返回路上，而且它遵循其自身的路线（见书后 p. 4 彩图 8）

除了这些单个机器人路径，我们还开发了一种非常接近于我们实验装置的多智能体模拟方法，这是为了测试当机器人具备了在场地地板上铺设路径的能力后是否比“通常的”没有磷光涂层的场地在效率上有所提高。仿真的结果表明使用路径可极大地提高效率（见图9）。

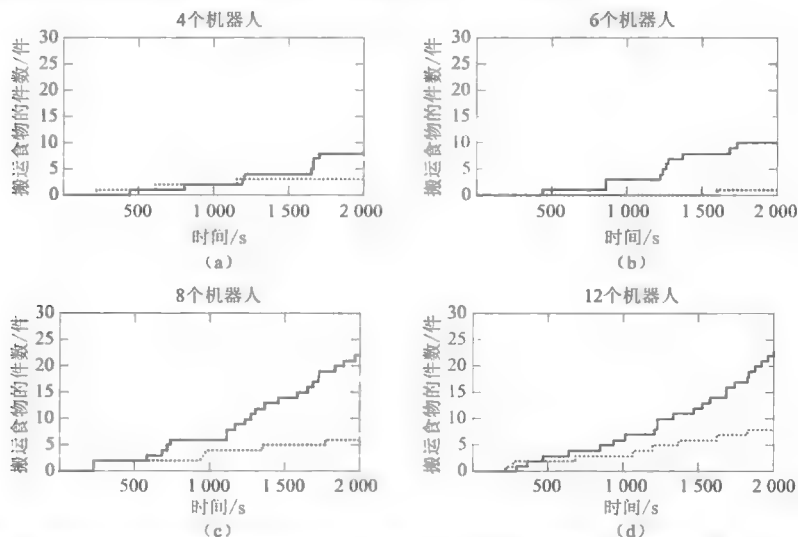


图9 4种不同仿真过程中的效率测量 图(a)为4个机器人的情况，图(b)为6个机器人的情况，图(c)为8个机器人的情况，图(d)为12个机器人的情况。实线表示信息素开启时的情况，虚线表示没有信息素的情况，曲线表示搬运至出发点的食物件数。该图表明，通过使用信息素路径，极大地提高了智能体的效率。

将来我们计划用多个机器人实验来全面模仿真实世界中的蚁群觅食行为，图10给出这种可能情况的设计照片。

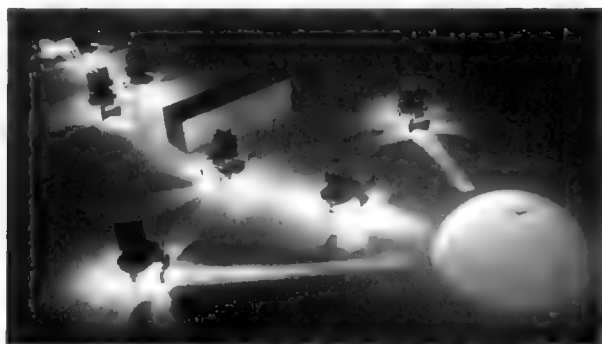


图10 未来的工作中如何使用闪光的地板和传感器的设计照片。两个机器人正离开出发点寻找食物，其他的机器人正被导引至障碍物周围的出发点（见书后 p. 5 彩图 10）

3 机器人机体的进化自组织控制结构

前面的章节中，我们已经讨论了交哺启发算法和蜂群算法。交哺启发算法的效率虽然在模拟研究中表现突出（见图3），但这种系统中由于临近通信中的强烈通信干扰而很难在实际中应用（比如声和红外光）。

然而，在机器人机体中，各个模块紧密连接在一起，它们之间的通信缺陷较少而且其带宽通常较高。因此，我们准备再次为机器人机体开发适应性子单元网络，这些子单元直接进行自主式相互作用，而且能够在机器层面上产生集体信息（地图，波形等）。此外，这种系统本身不需要手工编码，它（几乎）相当于一种能够同时编码多个过程的开放式动态系统。我们同样在自然界中寻找与此相当的对对应物，发现单细胞生物中的信号处理和多细胞生物中的稳态激素控制可作为这种开放式系统的很好的模型。

为了使进化计算的操作码能够在机器人机体配置过程中起作用，将相关的动态系统参数化后编码为机体的一种被称为“基因组”的数据结构，它可以用来进行选择、变异和遗传。我们将这种控制系统称为人工稳态激素系统（AHHS），在文献[10, 29, 28, 36]中有对其基本的定义和研究。

3.1 机器人控制中的 AHHS

在 AHHS 中，用一种生理模型描述机器人的内部空间，而且该模型能够控制机器人的行为：传感器引发激素的分泌，这将增加机器人虚拟身体内的激素浓度。这些激素发生扩散、合并、衰减、相互作用并最后影响执行器。虚拟身体被分为几个部分，每一个部分与实际机器人体的某一个特定部件相联系，这有利于形成复杂的行为。每一个传感器和执行器与这些部分中的其中一个相联系，这样我们就实现了一种能够执行合适时空环境中任务的具体装置。

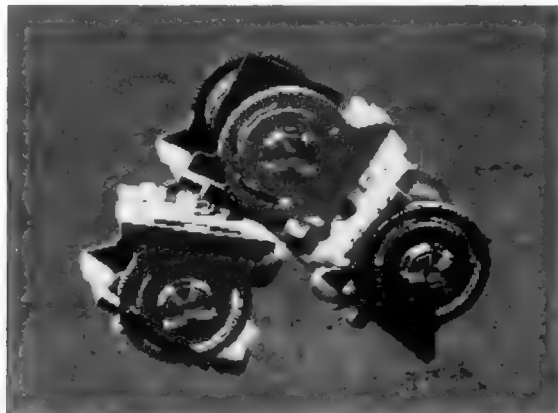
AHHS 的主要功能是基于受动态感官刺激干扰的稳态过程。初始时将 AHHS 的激素浓度设为零，系统一旦启动，便示例了一种初始的内在动力，激素浓度开始增加，而且激素开始相互作用，即使没有初始的传感器输入，这种情况也会发生。从系统理论的观点看，系统将经历一个暂态过程直到达到一个平衡态，或者更精确地说是达到一种吸引子状态（固定点、振荡，甚至是一种混沌吸引子），这可以被解释成是一种动态平衡。传感器一旦有非零的输入报告，当前的平衡态就被打破，如果传感器的输入长时间固定不变的话，系统将寻求和建立一种与当前传感器的输入对应的平衡态。通常

每一个机器人模块都执行一个共同的控制器，这些控制器通过从一个模块到另一个模块扩散的激素来进行通信

AHHS 可以由一个普通的差分方程（在处理器中离散）系统来执行，这样，对 AHHS 控制器的执行就可以在数学上被解释为具有时变扰动（传感器输入），且在时间上为初值问题的数值前向积分。

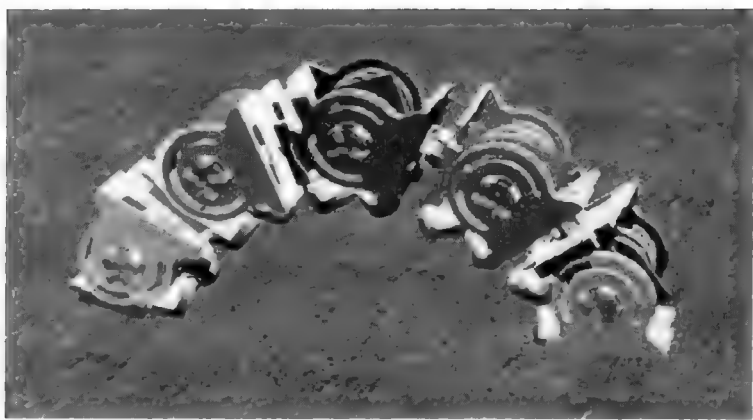
进化机器人学和多模块化机器人学中的一个重要问题是具有较高进化能力系统的实现，即通过人工进化快速合成控制器的问题。理解这种进化基本流程所需的一个很好的模型是适应面的概念，控制器合成场景中的适应面定义为从描述控制器特征的高维空间到通过执行控制器和观察结果行为得到的实际适应度值的映射。这种面的形状由多种影响因素来定义，比如机器人的任务、机器人的硬件、所在的环境、所使用的变异因子以及它本身的控制器设计。AHHS 的一种领先的设计是产生光滑的适应面，即变异因子存在一种高度的因果关系（控制器的微小变化会导致行为的微小变化）下面研究几种效应，比如可进化性与增加搜索空间之间的权衡。

人们已经研究了多模块化机器人学内容中的 AHHS，并与其他控制器方法进行了比较^{10,29}，其中之一的标准程序便是模块化机器人中所谓的“步态学习”（见图 11），文献 [12] 中报道了其一种结果，在图 12 中给出。图 12 中对 $N=12$ 的每种控制器方法独立运行时由人工进化得到的最佳适应度进行了比较，AHHS 较简单人工神经网络方法的优越性较为明显。



(a) 3个模块

图 11 模块化机器人中“步态学习”的标准程序场景实例。其中图 (a) 为 3 个模块，图 (b) 为 5 个模块。在图 (a) 和图 (b) 的两种构造中，AHHS 在几十代内进化并有效地移动机器人（见书后 p. 5 彩图 11）



(b) 5个模块

图 11 模块化机器人中“步态学习”的标准程序场景实例。其中图 (a) 为 3 个模块，图 (b) 为 5 个模块。在图 (a) 和图 (b) 的两种构造中，AHHS 在几十代内进化并有效地移动机器人（见书后 p. 5 彩图 11）（续）

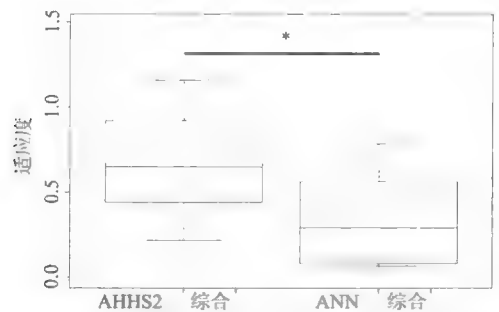


图 12 对拥有 3 个模块的步态学习任务 AHHS 控制器和一种简单人工神经网络间的比较 ($N = 12$)^[10]

3.2 AHHS 与其他类型控制器的比较

上面已经对所描述控制器的可进化性和可适应性进行了分析。作为第一种标准测试程序，选择一种场景，其中需要探索迷宫：将一个由 AHHS 控制的机器人置于一个模拟的 2D 场景中，并进行进化运行，对其使得机器人在场景中四处移动的行为给予较好的适应度值。进化运行中的机器人总体由 100 个个体组成，而且进化进行 500 代。作为比较，使用标准类型的人工神经网络 (ANN) 控制器对于同样的任务重复这些

进化过程。结果表明,在进化 500 代后,由两种控制器类型得到的最大和平均适应度没有区别。我们还对进化至令人满意的行为(总体最大适应度的 75%)所需时间进行了分析,这些研究表明,在经历 20 至 30 代的进化后,两种控制器都达到了该值,而且所观察到的行为是一种追壁行为(见图 13)。有趣的是,两种控制器类型主导的行为在性质上具有较大的不同,与 ANN 控制器相比,AHHS 控制机器人沿直线和非常光滑的曲线移动(见图 13 (a))。

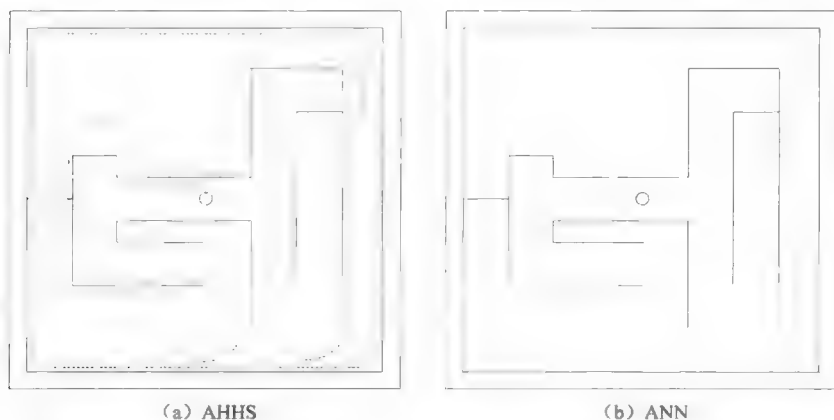


图 13 在“探索迷宫”场景中 (a) AHHS 和 (b) ANN 控制器的最佳进化个体的轨迹

4 控制器网络拓扑到体形的进化成形

神经网络代表了进化机器人学中的当前技术水平^[8],其优点是它们容易变异,而且对于计算来说非常强大且有效。与 ANN 相比,活的生物体表现出高度结构化的神经网络,通常我们分为大脑和神经中枢,而通常我们也能够找到这种神经中枢的规律,比如在腹神经索中的神经中枢。在这种结构化的网络中,特定的神经中枢(神经细胞的成簇聚集物)能够专注于特定部位的局部任务,比如协调附近肢体的运动。一种产生这种人工神经网络构型的工程方法是 Hyperneat^[34],它是 Neat^[35]的扩展,并且在多个场合中成功应用^[5,4]。为了增强进化机器人系统的功能,我们将致力于设计一种构型产生系统,它用来模仿多细胞机体的生长过程(见图 14)。为了实现这一目标,我们开发了虚拟胚胎发育(VE)来自主且动态地产生多种拓扑结构^[39,16]。VE 的主要思想是对类似 EvoDevo 过程的模拟^[3],

这些过程能够在自然界中多细胞生物发育阶段中观察到，比如果蝇等^[19]。模仿 EvoDevo 过程使得我们能够并行地进化网络构型和多模块机器人形状（见图 15（b）），从而能够预测一种对控制器和相应机体形状的联合评估。



图 14 结构化 ANN 的进化 图（a）为给定的机器人形状，它是人工进化过程适应度函数的一部分 图（b）是虚拟胚胎的进化形状，它们组成了 ANN 网络拓扑。图（c）是一种 ANN 拓扑的例子，它由该胚胎生长而来（见书后 p. 6 彩图 14）

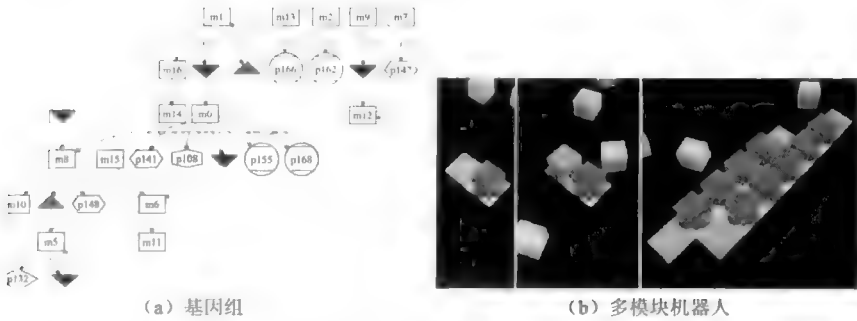


图 15 图（a）控制图 14b 中胚胎生长过程的进化基因组结构。基因组中的每一个基因都能够产生蛋白质，这些蛋白质反过来能够活化其他基因来产生成形成素，改变细胞对成形成素的接受能力，或者与其他细胞间建立神经连接。其中基因和蛋白质用几何形状来表示，蛋白质和基因之间的相互作用用箭头表示。图（b）在模拟环境中使用虚拟胚胎的多模块机器人成形。与上面提到的 VE 相比，细胞的复制过程通过连接机器人模块和机器人机体来实现。蓝色盒子表示已经连接的机器人模块，它们是多细胞机器人机体的一部分，绿色块表示一个“自由度”机器人模块能够连接到机器人机体的位置 左侧子图：过程的开始，机器人机体只由单个模块组成，它正在等待另一个模块进行连接；中间子图：连接了一个机器人模块，现在机器人机体由 2 个模块组成；右侧子图：机体成形进行中，多个模块已经连接在了一起（见书后 p. 6 彩图 15）

经虚拟胚胎发育而来的胚胎（见图 14（b））由许多单个细胞组成，虚拟胚胎发育的生长过程同样由基因组控制（见图 15）。AHHS 和 VE 的规则集之间具有高度的相似性，这也可以从基因组语法与计算机语法规则的相似性上反映出来。在 VE 中，基因组将细胞的反应编码为不同浓度的成形成素（由细胞产生的虚拟化学物质在整个胚胎内扩散），这可以与激素在 AHHS 中的流动相比较。在整个胚胎发育过程中，胚胎的每一个细胞都具有相同的基因组，而且基因组在细胞的生命周期内不会改变，子代细胞与它们的父代细胞具有相同的特性，这样就能够出现特化作用。图 14 给出了一种典型的目标机器人机体，进化胚胎以及由这种虚拟胚胎生长而来的 ANN 拓扑。图 15 描述了只有基因组控制的进化，图中还指明了基因产物之间存在的信息反馈，了解这种反馈网络对于理解进化过程中能够观察到的进化路径非常重要，这种理解与生物学研究具有相似的思想方法，而且是当前技术水平的热门话题。AHHS 和 VE 都是利用经典的仿生方法从生物学中演化而来并用来解决工程问题，而且两种模型也能够推动生物领域中新的理解和新的研究，我们的机器人机体开发中的进化过程与自然界中对应物进化中的“如何”和“为什么”非常相似。

5 讨论

从前面的所有章节中可以看出，仿生、拟生和人工进化很明显是为群体机器人生成控制软件的潜在方案，在我们的研究中展示了两种类型的群体机器人（机器人群和机器人机体）。

从单纯的工程角度来看，当机器人控制取得足够进步的同时，生物学研究是否从仿生机器人中吸取益处并不是一个问题，但可能由于我本人是生物出身，所以我相信仿生机器人学能够为生物学家和机器人工程师提供互惠关系。

我尝试使用一种两倍方法来完成这种互惠关系：一方面，我的实验室成员同时使用机器人和动物完成了大量的研究方案，这样就使得两组研究人员相互影响，这就可以发生比如一组研究人员在任何时候都能启发另一组人员进行新的实验方案的现象。另一方面，我们开发了“拟生”机器人，它们由自然衍生的“仿生”控制软件驱动，这进一步支持了这种潜在的科学互惠关系。此外，我们遵循了另一种联合研究的方法，它是抽象（宏观的）建模，通过开发这种模型，我们能够发掘两种自然系统的“算法核心”，以及最新开发的机器人系统。使用这种方法，通过抽象和归纳，

我们能够得出对这两种系统内以及它们之间的相似性和内在因果关系的新的科学见解。

在绝大多数的方法中，我们使用正反馈和负反馈网络并延迟控制集体系统（群和机体）的行为，尤其是在交哺启发算法中。同样，在 AHHS 和 VE 中，其主要的组成部分是基于行为的分布式多层次自我平衡，其中每一个单个模块以及集体系统都设计为自主平衡的稳态系统。集体机器人学的类似概念在文献 [32] 中关于机器人机体和文献 [33] 关于群系统中进行了概述。我们研究 AHHS 和 VE 的方法尽管存在较大的不同，但与文献 [33] 中的方法具有一定的相似性，我们的方法以文献 [20] 中的进化适应性为基础。AHHS 和 VE 的某些方面同样可以解释为基因调控网络（GRN），就像在文献 [17] 中研究的那样。在 AHHS 和 VE 的中，这些类 GRN 的功能只是在局部起作用，而且一定与机器人的形状（或者是虚拟胚胎的模拟物理形状）有关，所以我们的研究范式包含了形体的重要方面，就像在文献 [21] 中讨论的一样。

就像在本章介绍部分中指出的，“仿生”和“拟生”的方法之间具有较大的不同。仿生意味着从生物灵感源得到原理和功能，可以将它们用相似的方法转换为技术应用中的功能。比如翼形飞机实际上模仿的是鸟翼，它们之间的体形差别也较为明显：鸟翼是可弯折的，并且是由硬的骨架组成，鸟翼上有几个关节，并且被非常轻且软的羽毛覆盖。相比之下，机翼为刚性固体且没有类似羽毛的结构，它们没有关节，其基本骨架具有中值刚度。

拟生的方法更多地关注所开发的技术实体与生物体看起来或感觉起来相像，但在内部则具有完全不同的机制，一个最重要的例子是类人机器人、玩具机器人（狗、恐龙等）和稻草人。

图 16 中描述了一个沿两个轴展开的特征空间：顶端的轴表示仿生的水平，而右侧的轴表示拟生的水平。在左下方拐角处（b），我们看到经典的技术实体（比如汽车、手机、计算机和卫星），它们应用非仿生的机制，而且与生物体没有相似性。在左上方的拐角处（a），我们看到典型的拟生形式，它们看起来与生物体相似，但却是基于典型的技术机制。在右下方拐角处（c），我们发现了仿生算法，它们模仿的是自然界中发现的机制，但它们是计算机算法，具有完全不同的物理本质，机翼可以分在这一组。

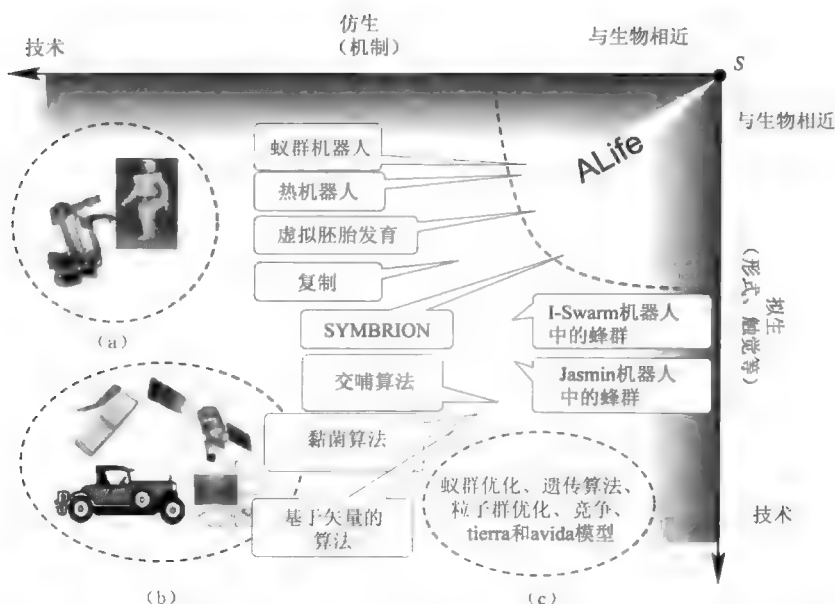


图 16 仿生/拟生特征空间。顶部轴：仿生水平，应用类自然机制的技术位于该轴的右端 右侧轴：拟生水平，技术实体与其生物对应物越相似，其在轴上的位置越高 S：ALife 奇点，表示仿生和拟生的最高模仿水平，位于该点上的技术产品具有从内部（机制）和外部（拟生）都不可区分其何种形式的自然机体。关于该图中例子的讨论见正文。图片来源于维基评论

在右上方的拐角处，我们发现了 ALife 研究领域，这种研究致力于实现对类生命结构和机制的创造，它试图沿两个方向最大化特征空间中的部分。在最右上方拐角处，我们发现了前面提到的 ALife 奇点，它只有在所制作的机器人在两条轴上都达到最高的水平时，才能达到——这种实体与自然界中的生物体没有区别。

就像在图中给出的，我们实验室的工作正在一步步地接近 ALife 拐点，早期的机器人算法（多智能体模拟或非生物模拟机器人中的交哺算法，黏菌算法和蜂群）与 ALife 区域相去甚远，新近的研究（比如 SYMBRION、热机器人、蜂群机器人）与右上方拐点更加接近。但我们的项目对 ALife 领域还没有非常深入的了解，表明我们的工作还与再现生命机体相去甚远，其原因也在图 16 中给出：在两条轴上都有阴影区域，它们表示一种“无法接近”的区域。我认为没有较高级度的拟生，一定程度的仿生是不能够实现的，反之亦然。这就意味着对于模仿活性生物体机制的技术实体，其外形和材料必须以一个很好调节的方式来支持——或者许可这些机

制，只有特定的形状和材料才能使之得到近乎自然的功能和机制。

工作中，我们在多种情形下认识到实施方式的重要性：每当我们通过观察动物发现一种（群）智能行为时，我们就将其转译为工作良好的模型和算法。但当在实际具身体（机器人）上执行这些机制时，则会遇到其性能极大幅度下降的情况。在这一点上，有两种方法可以选择：一方面，有可能以一种使其更好地适应新的实施方式形式的方法来采用这种机制（算法），这在我们实验室经人工进化的开发已经实现。这种适应性极大地增进了技术系统的性能，但不会使系统在图 16 中更加靠近右上方的拐角（S），因为它不会增加拟生的水平。另一方面，有可能改变实施方式的形式，这可以增加拟生的程度。这一步包括硬件工程和新材料的测试。尽管这种方式更加费时，且像第一种方法一样资源密集，但它使系统更加接近或者深入人工生命的领域。

对于群智能系统，实施方式是一个重要的挑战，也是机遇^[21]。许多在非物化系统中运行良好的算法，比如优化算法^{22,12,7}等，一旦将它们用于具身体中时，就会表现出极低的效率。同样，许多将物体看作是空间中无体积点的宏观模型（ODE、PDE）并不能得到具身体（机器人）群或机体所必需的微观行为规则（算法）。频繁的碰撞，一个具身体施加于另一个具身体的力，以及其他形式的物理干扰，会阻碍算法在实际世界中具体化的系统中很好地运行。例如：我们的蚁群机器人在蚁群寻径中仍然有碰撞处理上的问题，而这在蚁群信息素寻径的 ODE 模型中没有出现。蚁群算法向碰撞处理程序扩展得越多，整个蚁群机器人的算法与 ODE 模型中描述的机制也就偏离得越远。

然而，现有的物理学不只对仿生/拟生机器人提出了问题，物理现象的揭示也为这种集体系统的工程化提供了重要的机会：自组织系统突现的现象可以被像人工进化所展现的集体行为和抽象模型中不可企及的解决方法等优化程序所采用，因为在绝大多数情况下都失去了这种机制的一个主要的组成部分——物理。基于物理相互作用的物理特性和机制，能够提供替代软件所执行算法机制的功能。在我看来，每一个具身体执行一种“主算法”，这种算法是对传感器系统、软件算法（包括 BIOS、操作系统、硬件抽象层和中间设备）、执行器、具身体的物理特性以及与环境（包括所有其他具身体）的所有物理相互作用的总结。如果这些组成部分中的一个改变了，“主算法”就会改变。同样，在这里，子组成部分间的相互作用会产生突现现象，这也表明了进化方法相比于工程方法的优越性。

在本讨论的最后，我想指明在仿生/拟生机器人学领域中，当前的机

电系统的一个主要缺点——繁殖。在图 16 中, 通往 ALife 奇点路由于两个“不可企及”区域的会聚而变得越来越窄。生命系统的一个必要功能是其繁殖能力, 在非具身系统 (比如遗传算法^[12] 或者进化策略^[22]) 中这一问题并不存在, 实际世界中自主具身体的繁殖目前在机电器件中还不能实现。为了实现具身体繁殖, 材料科学必须为机器人学领域开启新的技术和材料, 而且 ALife 研究必须解决许多与繁殖相关的问题, 以便在这一水平上实现自主繁殖。目前, 许多研究者正在讨论这一问题 (个人交流), 并将 ALife 领域更多地推向细菌甚至是生物分子的研究中。在这些系统中, 繁殖问题已经在本质上得到解决, 这样这些研究中的科学进步并不能增进我们对大型具身体组成部分如何进行繁殖的理解。由于机器人学的基本目标是在人类面对灾难、痛苦和烦琐的工作时为人类提供服务和帮助, 所以大型机器人 (至少是厘米范围) 仍然是一个有价值的挑战和工具。而这一需求并不能经过改变细菌或分子来满足, 因为它们不能执行现实世界中机器人能够胜任的绝大多数任务。总之, 我认为应用机电器件的 ALife 的研究应当继续研究, 当然这种研究还应当与自组织、进化和产生复杂生命形式的新型研究同时进行。

参考文献

- [1] Blow, M.: 'stigmergy': Biologically-inspired robotic art. In: Proceedings of the Symposium on Robotics, Mechatronics and Animatronics in the Creative and Entertainment Industries and Arts, pp. 1-8 (2005)
- [2] Bonani, M., Raemy, X., Pugh, J., Mondana, F., Cianci, C., Klapotcz, A., Magnenat, S., Zufferey, J.-C., Floreano, D., Martinoli, A.: The e-puck, a robot designed for education in engineering. In: Proc. of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, vol. 1, pp. 59-65 (2009)
- [3] Carrol, S. B.: Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo. W. W. Norton, New York (2006)
- [4] Clune, J., Beckmann, B., Ofria, C., Pennock, R.: Evolving coordinated quadruped gaits with the hyperneat generative encoding. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computing Special Section on Evolutionary Robotics, Trondheim, Norway (2009)
- [5] Clune, J., Beckmann, B. E., Ofria, C., Pennock, R. T.: Evolving coordinated quadruped gaits with the hyperneat generative encoding. In: Proceedings of the 2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), IEEE, New York (2009)
- [6] Corradi, P., Schmickl, T., Scholz, O., Menciassi, A., Dario, P.: Optical networking

- in a swarm of microrobots. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering 3 (2), 107 – 119 (2009)
- [7] Dorigo, M. , Stützle, T. : Ant Colony Optimization. The MIT Press, Cambridge (2004)
- [8] Floreano, D. , Dürr, P. , Mattiussi, C. : Neuroevolution; From architectures to learning. Evolutionary Intelligence 1, 47 – 62 (2008)
- [9] Garnier, S. , Tache, F. , Combe, M. , Grimal, A. , Theraulaz, G. : Alice in pheromone land; An experimental setup for the study of ant-like robots. In: Swarm Intelligence Symposium, SIS 2007, pp. 37 – 44. IEEE, New York (2007)
- [10] Hamann, H. , Stradner, J. , Schmickl, T. , Crailsheim, K. : A hormone-based controller for evolutionary multi-modular robotics; From single modules to gait learning. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2010), pp. 244 – 251 (2010)
- [11] Heran, H. : Untersuchungen über den Temperatursinn der Honigbiene (*Apis mellifica*) unter besonderer Berücksichtigung der Wahrnehmung strahlender Wärme. Zeitschrift für vergleichende Physiologie 34, 179 – 206 (1952)
- [12] Holland, J. H. : Adaptation in Natural and Artificial Systems. Univ. Michigan Press, Ann Arbor (1975)
- [13] Jasmine. Swarm robot-project website (2010), <http://www.swarmrobot.org/>
- [14] Kennedy, J. , Eberhart, R. C. : Particle swarm optimization. In: Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4 (1995)
- [15] Kernbach, S. , Thenius, R. , Kornienko, O. , Schmickl, T. : Re-embodiment of honey-bee aggregation behavior in an artificial micro-robotic swarm. Adaptive Behavior 17, 237 – 259 (2009)
- [16] Levi, P. , Kernbach, S. (eds.) : Symbiotic Multi-Robot Organisms; Reliability, Adaptability, Evolution. Springer, Heidelberg (2010)
- [17] Mattiussi, C. , Floreano, D. : Analog genetic encoding for the evolution of circuits and networks. IEEE Transactions on evolutionary computation 11, 596 – 607 (2007)
- [18] Mayet, R. , Roberz, J. , Schmickl, T. , Crailsheim, K. : Antbots; A feasible visual emulation of pheromone trails for swarm robots. In: Dorigo, M. , Birattari, M. , Di Caro, G. A. , Doursat, R. , Engelbrecht, A. P. , Floreano, D. , Gambardella, L. M. , Groß, R. , S, ahin, E. , Sayama, H. , Stützle, T. (eds.) ANTS 2010. LNCS, vol. 6234, pp. 84 – 94. Springer, Heidelberg (2010)
- [19] Meinhardt, H. , Gierer, A. : Pattern formation by local self-activation and lateral inhibition. Bioessays 22, 753 – 760 (2000)
- [20] Nolfi, S. , Floreano, D. : Evolutionary Robotics; The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines. MIT Press, Cambridge (2004)
- [21] Pfeiffer, R. , Bongard, J. C. : How the Body Shapes the Way We Think. MIT Press, Cambridge (2006)

- [22] Rechenberg, I. : Evolutionsstrategie 1994. Frommann Holzboog (1994)
- [23] REPLICATOR. Project website (2010), <http://www.replicators.eu>
- [24] Russell, R. A. : Heat trails as short-lived navigational markers for mobile robots. In: Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, 1997, vol. 4, pp. 3534 – 3539 (1997)
- [25] Russell, R. A. : Ant trails-an example for robots to follow? In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999, vol. 4, pp. 2698 – 2703 (1999)
- [26] Schmickl, T. , Crailsheim, K. : A Navigation Algorithm for Swarm Robotics Inspired by Slime Mold Aggregation. In: S. ahin, E. , Spears, W. M. , Winfield, A. F. T. (eds.) SAB 2006 Ws 2007. LNCS, vol. 4433, pp. 1 – 13. Springer, Heidelberg (2007)
- [27] Schmickl, T. , Crailsheim, K. : Trophallaxis within a robotic swarm: bio-inspired communication among robots in a swarm. Autonomous Robots 25 (1 – 2), 171 – 188 (2008)
- [28] Schmickl, T. , Crailsheim, K. : Modelling a hormone-based robot controller. In: 6th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, MATHMOD 2009 (2009)
- [29] Schmickl, T. , Hamann, H. , Stradner, J. , Crailsheim, K. : Hormone-based control for multi-modular robotics. In: Levi, P. , Kernbach, S. (eds.) Symbiotic Multi-Robot Organisms: Reliability, Adaptability, Evolution. Springer, Heidelberg (2010)
- [30] Schmickl, T. , Möslinger, C. , Thenius, R. , Crailsheim, K. : Individual adaptation allows collective path-finding in a robotic swarm. International Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing 4, 102 – 108 (2007)
- [31] Schmickl, T. , Thenius, R. , Möslinger, C. , Radspieler, G. , Kernbach, S. , Crailsheim, K. : Get in touch: Cooperative decision making based on robot-to-robot collisions. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 18 (1), 133 – 155 (2008)
- [32] Shen, W. -M. , Salemi, B. , Will, P. : Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for CONRO self-reconfigurable robots. IEEE Trans. on Robotics and Automation 18 (5), 700 – 712 (2002)
- [33] Shen, W. -M. , Will, P. , Galstyan, A. , Chuong, C. -M. : Hormone-inspired self-organization and distributed control of robotic swarms. Autonomous Robots 17, 93 – 105 (2004)
- [34] Stanley, K. O. , D' Ambrosio, D. B. , Gauci, J. : A hypercube-based encoding for evolving large-scale neural networks. Artificial Life 15 (2), 185 – 212 (2009)
- [35] Stanley, K. O. , Miikkulainen, R. : Competitive coevolution through evolutionary complexification. Journal of Artificial Intelligence Research 21 (1), 63 – 100 (2004)
- [36] Stradner, J. , Hamann, H. , Schmickl, T. , Thenius, R. , Crailsheim, K. : Evolving a novel bio-inspired controller in reconfigurable robots. In: 10th European Conference on Artificial Life (ECAL 2009) . LNCS, Springer, Heidelberg (2010)

- [37] Svennebring, J. , Koenig, S. : Building terrain-covering ant robots: A feasibility study. *Autonomous Robots* 16 (3) , 313 –332 (2004)
- [38] SYMBRION. Project website (2010) , [http: //www. symbion. eu](http://www.symbion.eu)
- [39] Thenius, R. , Schmickl, T. , Crailsheim, K. : Novel concept of modelling embryology for structuring an artificial neural network. In: Troch, I. , Breitenecker, F. (eds.) *Proceedings of the MATHMOD (2009)*
- [40] Valdastrì, P. , Corradi, P. , Menciassi, A. , Schmickl, T. , Crailsheim, K. , Seyfried, J. , Dario, P. : Micromanipulation, communication and swarm intelligence issues in a swarm microrobotic platform. *Robotics and Autonomous Systems* 54, 789 –804 (2006)

第三章 喧嚣和嘈杂环境中的 多体集群控制算法

Hung Manh La, Weihua Sheng

Hung Manh La, 俄克拉荷马州立大学电子与计算机系, 美国, Stillwater, OK 74078, e-mail: hung_la@okstate.edu

Weihua Sheng, 俄克拉荷马州立大学电子与计算机系, 美国, Stillwater, OK 74078, e-mail: weihua.sheng@okstate.edu

摘要: 鸟类、蜜蜂和鱼类基于局部信息而成组地聚集在一起, 人们模仿这种自然现象, 设计了集群控制算法来协调喧嚣和嘈杂环境中多个机体的活动。首先, 为了使机体在喧嚣环境中更好地追踪和发现目标, 本文提出了自适应集群控制算法。有了这一算法, 所有的机体都能够更好地追踪目标并保持一种相似的队形和连接性。其次, 为了应对嘈杂环境, 本文提出了两种集群控制算法, 即多 CoM 收缩和多 CoM 聚集算法。基于这些算法, 即使处于嘈杂环境中, 所有机体也能够形成一个网络并保持连接性。我们还研究了所提出算法的稳定性和可扩展性, 并进行了仿真和实际的实验, 证实了所提出方法的有效性。

关键词: 集群控制, 多体系统, 移动传感器网络

1 介绍

集群是大量机体一起移动并发生相互作用的一种自然现象。在自然界中, 鱼群、鸟群、蚁群和蜂群等均属于集群现象。近年来, 人们已经对多个移动机体的集群控制进行了研究^[1,2], 其设计主要基于由 Reynolds^[3]提出的一种基本的集群规则: 群体集中、碰撞避免和速度匹配。近年来, 集群问题同样吸引了来自物理学、数学、生物学尤其是控制科学中的研究者^[1,2,7]。

集群控制在移动机器人和移动传感器网络中具有广泛的应用, 关于集群控制早期的工作^[1,2]包括 Tanner 等人^[1]使用双积分动力学研究了在固定和动态拓扑情况下多个移动机体系统的稳定性特性, 但在他们的工作中没

有考虑目标追踪问题和检测误差。在目标追踪方面, Olfati-Saber^[2]提出了分布式集群算法设计和分析的理论框架, 该理论解决了自由空间中以及存在障碍物时的集群问题。基于这种集群控制算法, 所有机体能够聚集在一起并在自由空间中很好地追踪目标, 但其在障碍空间中的目标追踪表现还不尽如人意, 而且其中假设每一个机体精确知道目标的位置和速度。为了放宽这一假设, 他在文献[8]中为每一个机体开发了一种分布式 Kalman 过滤器来估测目标的位置, 但由于测量误差, 目标追踪性能还不是太好。此外, 在他的集群算法^[2,8]中还存在另一个假设, 即所有机体都需要目标信息来保持聚集或者避免分散。为了处理这种情况, 文献[2]中在只有少数了解情况的机体的条件下使用虚拟导引物扩展了这种集群控制算法, 并在文献[7]中提出了虚拟导引物的变化速度。但他们的研究工作中没有考虑喧嚣和嘈杂环境中的追踪问题。

本文中我们提出了三种新的集群控制算法来应对更加现实的环境, 我们的算法与上述相关工作间的主要区别如下:

① 在喧嚣环境中, 机体经常会卡在障碍物后, 有时还不能追踪目标^[2]。为了处理这类问题, 我们提出了一种新的算法来集群控制多体系统, 使其能够避开障碍物并追踪移动的目标。该算法的主要动机是使机体以一种适应性和分布式的方式聚集在一起, 这样机体就能够更好地追踪移动的目标并在喧嚣的环境中保持连接性, 而传统的集群控制算法在这种环境中具有较差的追踪性能, 而且会丢失连接性。

② 在实际的集群控制环境中, 噪声处理通常是一个重要的问题, 这是因为噪声通常会引引起断网和连接丢失。这一问题在集群控制的绝大多数先前的工作中经常存在^[1,2,7,8]。为了使集群控制更好地适应实际应用, 我们考虑了机体本身、临近机体和目标的位置以及速度对测量误差的影响, 而上述相关工作中的集群控制算法还没有考虑这些噪声问题。我们提出了两种集群控制算法——多 CoM 收缩和多 CoM 聚集算法, 它们是基于对我们先前工作中的多 CoM 集群控制算法的扩展^[9]。我们的算法使得群体能够保持连接性, 避免碰撞, 并在嘈杂的环境中追踪目标。研究表明, 通过应用我们的算法, 机体能够在噪声存在时以更好的性能聚集在一起, 这些性能包括连接性和追踪性能。

下文的组织如下: 第2节中我们给出集群控制和问题提出的背景; 第3节中描述在无噪声环境中追踪和观察移动目标的适应性集群控制算法; 第4节给出在嘈杂环境中追踪移动目标的集群控制算法, 即多 CoM 收缩和多 CoM 聚集算法; 第5节给出无噪声和噪声环境中集群控制的稳定性分析的主要结果; 第6节阐述实验结果; 最后, 在第7节中得出本文的结论。

2 集群背景和问题提出

本节我们给出集群控制的背景和现有集群控制算法中存在的问题。

考虑 n 个机体在 m ($m=2, 3$) 维欧氏空间中的移动, 每一个机体的动力学方程可以描述为:

$$\begin{cases} \dot{q}_i = p_i \\ \dot{p}_i = u_i, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

其中 $q_i, p_i \in \mathbf{R}^m$, 分别为节点 i 的位置和速度; u_i 为机体 i 的控制输入。

为了描述群的拓扑结构, 我们考虑一由顶点集 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}$ 和边集 $E \subseteq \{(i, j): i, j \in \mathcal{V}, j \neq i\}$ 组成的动态图, 在该拓扑结构中, 每一个顶点表示群的一个成员, 而每一条边则表示两成员间的通信连接。

我们知道在机体移动时, 它们之间的相对距离会发生变化, 从而每一个机体的临近机体也会变化, 这样我们就能够定义机体 i 的邻域集为:

$$N_i^\alpha = \{j \in \mathcal{V}: \|q_j - q_i\| \leq r, \mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}, j \neq i\} \quad (2)$$

这里 r 为活动范围 (在二维空间中为邻域圈的半径, 在三维空间中为邻域球的半径); $\|\cdot\|$ 为欧氏距离; 上标 α 表示用于与虚拟临近体 (β 临近体) 区分的机体 i 的实际临近体 (α 临近体), 这在后面讨论障碍物避开时会用到。

集群的结构可以用一种 α 网格^[2]来建模, 它满足下面的条件:

$$\|q_j - q_i\| = d, j \in N_i^\alpha \quad (3)$$

其中 d 为表示机体 i 与其相邻机体 j 之间的距离的正常数。然而, 对于奇异结构 ($q_i = q_j$), 用于构建集群结构的集体势并不能够区分, 所以在文献 [3] 中使用 σ 规范^[2] 将其重新写为一组代数约束如下:

$$\|q_j - q_i\|_\sigma = d^\alpha, j \in N_i^\alpha \quad (4)$$

这里的约束 $d^\alpha = \|d\|_\sigma$, 其中 $d = r/k_i$, k_i 为比例系数。一个矢量的 σ 规范 $\|\cdot\|_\sigma$ 为一映射, 定义为:

$$\|z\|_\sigma = \frac{1}{\varepsilon} [\sqrt{1 + \varepsilon \|z\|^2} - 1] \quad (5)$$

这里 $\varepsilon > 0$ 。与欧氏规范 $\|z\|$ 在 $z=0$ 时不可区分不同, σ 规范 $\|z\|_\sigma$ 在任何位置都可以区分, 这一性质可以为机体构建一个平滑的集体势函数。

文献 [2] 中的集群控制律控制所有机体形成一个 α 网格结构, 这一算法由三个部分组成:

$$u_i = f_i^\alpha + f_i^\beta + f_i^\gamma \quad (6)$$

式 (6) 中的第一部分 f_i^α 由一个基于梯度的分量和一个一致分量 (关于该分量的详细讨论见文献 [10, 11, 12]) 组成, 它用来调整集体势

(排斥或吸引力) 和机体间的速度。

$$f_i^\alpha = c_1^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|q_j - q_i\|_\sigma) \mathbf{n}_{ij} + c_2^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} a_{ij}(q)(p_j - p_i) \quad (7)$$

其中 c_1^α 和 c_2^α 为正常数, 式 (7) 中的每一项计算如下^[2]:

① 对于所有 $z \geq r^\alpha$, $r^\alpha = \|r\|_\sigma$ 时消失的作用函数 $\phi_\alpha(z)$ 定义为:

$$\phi_\alpha(z) = \rho_h(z/r_\alpha) \phi(z - d^\alpha) \quad (8)$$

齐次的反双曲函数 $\phi(z)$ 定义为 $\phi(z) = 0.5[(a+b)\sigma_1(z+c) + (a-b)]$,

其中 $\sigma_1(z) = z/\sqrt{1+z^2}$ (z 为任意变量), 参数 $0 < a \leq b$, $c = |a-b|/\sqrt{4ab}$ 是为了保证 $\phi(0) = 0$ 。 $h \in (0,1)$ 的冲击函数 $\rho_h(z)$ 为:

$$\rho_h(z) = \begin{cases} 1, & z \in [0, h) \\ 0.5 \left\{ 1 + \cos \left[\pi \left(\frac{z-h}{1-h} \right) \right] \right\}, & z \in [h, 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

② 沿 q_i 和 q_j 连接线的矢量为:

$$\mathbf{n}_{ij} = (q_j - q_i) / \sqrt{1 + \varepsilon \|q_j - q_i\|^2} \quad (10)$$

③ 邻接矩阵 $[a_{ij}(q)]$ 中的元素 $a_{ij}(q)$ 定义为:

$$a_{ij}(q) = \begin{cases} \rho_h(\|q_j - q_i\|_\sigma / r_\alpha), & j \neq i \\ 0, & j = i \end{cases} \quad (11)$$

定义成对的吸引/排斥势 $\Psi_\alpha(z)$ 为:

$$\Psi_\alpha(z) = \int_{d^\alpha}^z \phi_\alpha(s) ds \quad (12)$$

该函数的图线如图 1 所示。

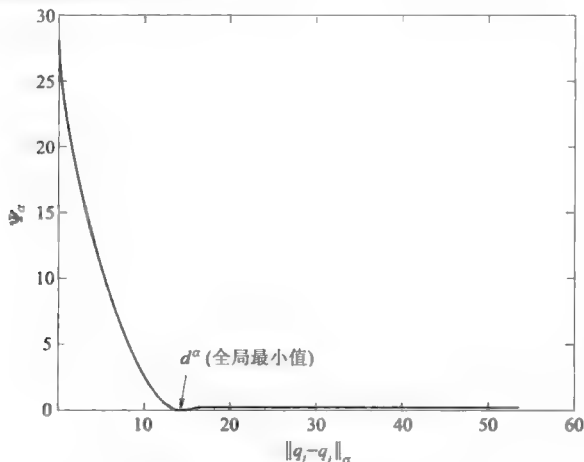


图 1 平滑的成对势函数 $\Psi_\alpha(\|q_j - q_i\|_\sigma)$

这样我们就能够得到下面形式的平滑集群势函数:

$$V_{\alpha}(q) = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \Psi_{\alpha}(\|q_j - q_i\|_{\sigma}) \quad (13)$$

式(6)中的第二项 f_i^{β} 用来控制移动机体,使其避开障碍物:

$$f_i^{\beta} = c_1^{\beta} \sum_{k \in N_i^{\beta}} \phi_{\beta}(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_{\sigma}) \hat{n}_{i,k} + c_2^{\beta} \sum_{k \in N_i^{\beta}} b_{i,k}(q)(\hat{p}_{i,k} - p_i) \quad (14)$$

其中 c_1^{β} 和 c_2^{β} 为正常数。在时间 t 时刻,机体 i 的具有 k 个障碍物的 β 临近机体组(虚拟体)为:

$$N_i^{\beta}(t) = \{k \in \mathcal{D}_{\beta}: \|\hat{q}_{i,k} - q_i\| \leq r', \mathcal{D}_{\beta} = \{1, 2, \dots, k\}\} \quad (15)$$

这里选择 r' 小于 r ,我们的仿真中 $r' = 0.6r$ 。 \mathcal{D}_{β} 为一组障碍物, $\hat{q}_{i,k}$, $\hat{p}_{i,k}$ 分别为机体 i 投影在障碍物 k 上的位置和速度。虚拟临近体用于产生排斥力,来推动机体远离障碍物。

与式(10)中定义的 n_{ij} 类似,矢量 $\hat{n}_{i,k}$ 定义为:

$$\hat{n}_{i,k} = (\hat{q}_{i,k} - q_i) / \sqrt{1 + \varepsilon \|\hat{q}_{i,k} - q_i\|^2} \quad (16)$$

邻接矩阵 $[b_{i,k}(q)]$ 中的元素 $b_{i,k}(q)$ 定义为:

$$b_{i,k}(q) = \rho_h(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_{\sigma}/d_{\beta}) \quad (17)$$

这里, $d_{\beta} = \|r'\|_{\sigma}$ 。

定义 β 临近体的排斥作用函数为:

$$\phi_{\beta}(z) = \rho_h(z/d_{\beta})[\sigma_1(z - d_{\beta}) - 1] \quad (18)$$

式(6)的第三个分量 f_i^{γ} 为一个分布式导航反馈:

$$f_i^{\gamma} = -c_1^{\gamma}(q_i - q_{\gamma}) - c_2^{\gamma}(p_i - p_{\gamma}) \quad (19)$$

其中 c_1^{γ} 和 c_2^{γ} 为正常数; γ 机体(q_{γ}, p_{γ})为虚拟导引物(关于虚拟导引物的更多信息参见文献[13],定义为:

$$\begin{cases} \dot{q}_{\gamma} = p_{\gamma} \\ \dot{p}_{\gamma} = f_{\gamma}(q_{\gamma}, p_{\gamma}) \end{cases} \quad (20)$$

最后,提出Olfati-Saber集群控制算法^[2]为:

$$\begin{aligned} u_i = & c_1^{\alpha} \sum_{j \in N_i^{\alpha}} \phi_{\alpha}(\|q_j - q_i\|_{\sigma}) n_{ij} + c_2^{\alpha} \sum_{j \in N_i^{\alpha}} a_{ij}(q)(p_j - p_i) + \\ & c_1^{\beta} \sum_{k \in N_i^{\beta}} \phi_{\beta}(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_{\sigma}) \hat{n}_{i,k} + c_2^{\beta} \sum_{k \in N_i^{\beta}} b_{i,k}(q)(\hat{p}_{i,k} - p_i) - \\ & c_1^{\gamma}(q_i - q_{\gamma}) - c_2^{\gamma}(p_i - p_{\gamma}) \end{aligned} \quad (21)$$

观察算法(21)我们发现,在喧嚣环境或者充满障碍物的空间中:

- 由于受到障碍物的排斥力,机体很难跟踪目标。
- 追踪性能不是太好。

- 机体有时在障碍物周围陷入困境。

- 网络有时会断网。

此外, 该算法是在下面的假设条件下工作的:

- 每一个机体都能够精确检测其自身的位置和速度 (无噪声)。
- 通过感知和通信, 每一个机体都能够精确得到其临近机体的位置和速度。
- 每一个机体都能够精确感知到目标的位置和速度。

然而, 在实际中, 这些假设并不有效, 因为通常会存在感知误差。受到这些观察的启发, 我们将研究如何设计分布式集群控制算法, 该算法即使在机体处于喧嚣环境中而且测量受到噪声影响的情况下, 也能表现良好。

3 追踪移动目标的适应性集群控制

将 γ 机体作为移动目标, 这样我们可以将集群控制算法^[21]稍微修改为:

$$\begin{aligned}
 u_i = & c_1^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|q_j - q_i\|_\sigma) n_{ij} + c_2^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} a_{ij}(q)(p_j - p_i) + \\
 & c_1^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} \phi_\beta(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_\sigma) \hat{n}_{i,k} + c_2^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} b_{i,k}(q)(\hat{p}_{i,k} - p_i) - \\
 & c_1^t(q_i - q_t) - c_2^t(p_i - p_t)
 \end{aligned} \quad (22)$$

其中 q_t 和 p_t 分别为移动目标的位置和速度; c_1^t, c_2^t 为正常数。在该控制算法中, 我们假设每一个机体都具有感受移动目标位置和速度的能力。

这里存在的问题是, 为了在存在障碍物时保持网络的连接性、相似的组成和追踪性能, 如何使用适应性和分散的方式协调网络的尺寸? 图 2 给出了这种集群控制的一个例子。

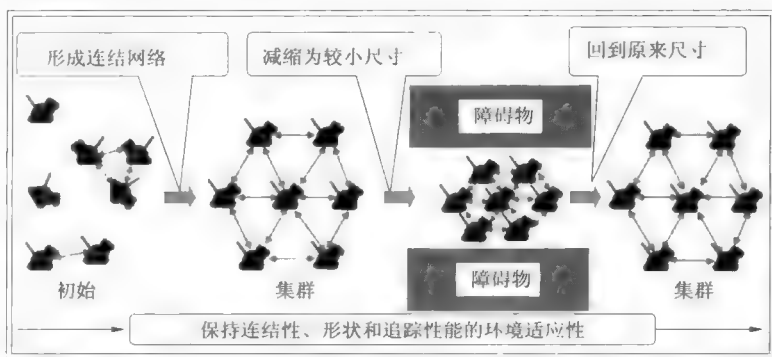


图 2 适应性集群控制的示例

为了控制网络的尺寸,需要控制方程(4)的代数约束,这意味着如果我们想要网络的尺寸足够小以便通过狭窄空间,那么应当使用较小的 d^a ,这就产生了需要将网络的尺寸减小到多小和如何用分散和动态的方法控制尺寸的问题。

控制约束 d^a 的一种可能的方法是使用网络中任何机体所得到的障碍物的信息,向所有其他机体传播一个新的 d^a 。但由于单个机体具有有限的感应范围,所以很难使其获悉通道的尺寸。为了克服这一问题,我们给排斥力 $\sum_{k \in N_i^\beta} \phi_\beta(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_\sigma)$ 提出了一种方法,该排斥力由投影在障碍物上的 β 机体(虚拟机体)产生。如果网络中的任何一个机体具有该排斥力,它将减缩其自身的 d_i^a ,而如果排斥力较大(机体靠近障碍物), d_i^a 将进一步减小,为了保持相邻状态(拓扑),每一个机体的活动范围将被重新设计。我们还提出了一种一致或局部平均更新算法来实现机体间的相对距离和其活动范围之间的一致性。另外,为了保持连接性,每一个机体将保持一个与目标之间的吸引力权重和一个与其临近机体间相互作用力的适应性权重,这样网络就可以逐渐减小或恢复其尺寸。也就是说,如果一个机体与网络之间具有较弱的连接性,那么它应当具有一个与目标之间较大的吸引力权重和一个与其临近机体间较小的相互作用力权重。

首先,控制代数约束组为:

$$\|q_j - q_i\|_\sigma = d_i^a, \quad j \in N_i^\alpha \quad (23)$$

并令每一个机体具有其自身的 d_i^a ,设计该值为:

$$d_i^a = \begin{cases} d^a, & \sum_{k \in N_i^\beta} \phi_\beta(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_\sigma) = 0 \\ \frac{d^a}{\sum_{k \in N_i^\beta} |\phi_\beta(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_\sigma)| + 1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

从式(24)中我们可以看出,如果障碍物产生的排斥力 $\sum_{k \in N_i^\beta} \phi_\beta(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_\sigma) = 0$ 或者 $N_i^\beta = \emptyset$ (空组),则机体将保持其原先的 d^a 。当机体感应到障碍物时,它将减小其自身的 d_i^a , d_i^a 的值取决于机体从障碍物受到的排斥力。

为了控制网络的尺寸,每一个机体需要其自身的 r_i^a ,它与 d_i^a 的关系是:

$$r_i^a = \|k_c d\|_\sigma, \quad \|d\|_\sigma = d_i^a \text{ 或 } d = \sqrt{\frac{(\varepsilon d_i^a + 1)^2 - 1}{\varepsilon}}, \quad r_i^a \text{ 精确的值由式 (25) 计算:}$$

$$r_i^\alpha = \begin{cases} r^\alpha, & \sum_{k \in N_i^\beta} \phi_\beta(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_\sigma) = 0 \\ \frac{1}{\varepsilon} \left[\sqrt{k_c^2 \frac{(\varepsilon d_i^\alpha + 1)^2}{\varepsilon}} + 1 - 1 \right], & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

与计算 r_i^α 类似, 计算 r_i 为:

$$r_i = \begin{cases} r, & \sum_{k \in N_i^\beta} \phi_\beta(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_\sigma) = 0 \\ \sqrt{\frac{1}{\varepsilon} [\varepsilon r_i^\alpha + 1]^2 - 1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

需要指出的是, 活动范围 r_i 与物理通信范围不同, 活动范围为每一个机体确定与其会话的临近机体的范围, 而物理通信范围为由 RF 模型定义的范围。这就说明, 即使一个机器人能够与网络中的许多其他机器人通信, 它也只能与其活动范围内的机器人进行会话 (相互作用)。这就是为什么我们想要通过控制每一个机器人的活动范围来减少通信并在网络收缩时保持相似的形状。

为了实现连接网络中机体之间 d_i^α , r_i^α 和 r_i 的一致性, 我们分别基于 d_i^α , r_i^α 和 r_i 的局域平均使用下面更新后的算法:

$$\begin{cases} d_i^\alpha = \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_j^\alpha \\ r_i^\alpha = \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} r_j^\alpha \\ r_i = \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} r_j \end{cases} \quad (27)$$

其中 $|N_i^\alpha|$ 为机体 i 临近机体的数量; $|N_i^\alpha \cup i|$ 为机体 i 及其临近机体的包容集。

相互作用力系数 (c_1^α, c_2^α) , (c_1^β, c_2^β) 和助力产生所需类群行为的吸引力系数 (c_1', c_2') 都是用来调整相互作用力和吸引力的权重的。系数对 (c_1^α, c_2^α) 用于调整机体 i 与其实际临近机体 (β 机体) 间的吸引力/排斥力, 系数对 (c_1^β, c_2^β) 用来调整机体 i 与其虚拟临近机体 (β 机体) 间的排斥力, 这些虚拟机体由机体 i 在遇到障碍物时产生, 系数对 (c_1', c_2') 用来调整机体 i 与其目标之间的吸引力。 c_1' 和 c_2' 的值越大, 向目标集中的速度越快。而如果 c_1' 和 c_2' 太大, 由式 (28) 定义的质量中心 (CoM) 将在目标周围振荡, 这就不能保证网络的形成。

$$\begin{cases} \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \\ \bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \end{cases} \quad (28)$$

从上面的分析中我们可以看出, 这些适应性权重使得网络能够逐渐减小和恢复其尺寸, 它们同样还可以使网络在障碍物空间中保持其连接性。所以, 我们令每一个机体拥有其自身的相互作用力权重:

$$c_1^\alpha(i) = \begin{cases} c_1^\alpha, & |N_i^\alpha| \geq 3 \\ c_1^{\alpha'}, & |N_i^\alpha| < 3 \end{cases} \quad (29)$$

这里, $c_1^{\alpha'} < c_1^\alpha$, $c_2^\alpha(i) = 2\sqrt{c_1^\alpha(i)}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

此外, 我们令每一个机体拥有其自身对于目标的吸引力权重为:

$$c_1'(i) = \begin{cases} c_1', & |N_i^\alpha| \geq 3 \\ c_1'^{\prime}, & |N_i^\alpha| < 3, \end{cases} \quad (30)$$

这里, $c_1' > c_1'$, $c_2'(i) = 2\sqrt{c_1'(i)}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

在 α 点阵构型中, 如果机体的临近机体小于 3 个, 则认为该机体与网络之间具有一个弱的连接性。这就意味着该机体位于网络的边缘, 或者距离目标较远, 这时就应当使其具有与其目标之间较大的吸引力权重和与其临近机体间较小的相互作用力权重, 以使其更加接近目标。这种设计还具有能够使整个网络更快地追踪目标的优点。

这时重新定义机体 i 的临近机体 $N_i'^\alpha$, 新的邻接矩阵 $a'_{ij}(q)$ 和新的作用函数 $\phi'_\alpha(z)$ 如下:

$$N_i'^\alpha = \{j \in \mathcal{V} : \|q_j - q_i\| \leq r_i, \mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}, j \neq i\} \quad (31)$$

$$a'_{ij}(q) = \begin{cases} \rho_h(\|q_j - q_i\|_\sigma / r_i^\alpha), & j \neq i \\ 0, & j = i \end{cases} \quad (32)$$

$$\phi'_\alpha(\|q_j - q_i\|_\sigma) = \rho_h(\|q_j - q_i\|_\sigma / r_i^\alpha) \phi(\|q_j - q_i\|_\sigma - d_i^\alpha) \quad (33)$$

最后可得到动态目标追踪的适应性集群控制律为:

$$\begin{aligned} u_i = & c_1^\alpha(i) \sum_{j \in N_i'^\alpha} \phi'_\alpha(\|q_j - q_i\|_\sigma) \mathbf{n}_{ij} + c_2^\alpha(i) \sum_{j \in N_i'^\alpha} a'_{ij}(q) (p_j - p_i) + \\ & c_1^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} \phi_\beta(\|\hat{q}_{i,k} - q_i\|_\sigma) \hat{\mathbf{n}}_{i,k} + c_2^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} b_{i,k}(q) (\hat{p}_{i,k} - p_i) - \\ & c_1'(i) (q_i - q_t) - c_2'(i) (p_i - p_t) \end{aligned} \quad (34)$$

4 嘈杂环境中多机体的集群控制

上述集群控制算法是在如下的假设下设计的：每一个机体都能够精确感受其自身、临近机体和目标的位置和速度。然而，在现实中这些假设并不有效，因为感受过程通常会存在噪声。基于这样的观察，我们研究了如何设计分布式控制算法，以使其在受到噪声干扰时仍能表现良好。

本节中我们将设计用于嘈杂环境中的两种算法，第一种为多 CoM 收缩集群控制算法，该算法的主要思想是减缩网络的尺寸以保持连接性。第二种为多 CoM 聚集算法，其主要思想是基于位置和速度的聚集反馈来创建机体和网络间的较强聚集力。两种算法都以我们先前工作^[9]中提出的多 CoM 集群控制算法为基础，多 CoM 集群控制算法为：

$$u_i = c_1^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|q_j - q_i\|_\sigma) n_{ij} + c_2^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} a_{ij}(q)(p_j - p_i) - c_1^l(q_i - q_t) - c_2^l(p_i - p_t) - c_1^l(\bar{q}_i - q_t) - c_2^l(\bar{p}_i - p_t) \quad (35)$$

其中 c_1^l 和 c_2^l 为正常数； \bar{q}_i 和 \bar{p}_i 分别为每一个机体 i 的位置和速度的局域平均，它们定义为：

$$\begin{cases} \bar{q}_i = \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha|} q_j \\ \bar{p}_i = \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha|} p_j \end{cases} \quad (36)$$

在该控制算法中，前两项用来控制成形（ α 点阵构型），并使得机体能够避免碰撞^[2]。项 $-c_1^l(q_i - q_t) - c_2^l(p_i - p_t)$ 和 $-c_1^l(\bar{q}_i - q_t) - c_2^l(\bar{p}_i - p_t)$ 使得每一个机体及其临近机体都能够紧跟目标^[9]。

4.1 多 CoM 收缩算法

假设对机体 i 的位置和速度的估计为： $\hat{q}_i = q_i + \varepsilon_q^i$ 和 $\hat{p}_i = p_i + \varepsilon_p^i$ ，其中 ε_q^i 和 ε_p^i 分别为位置和速度的测量误差，这样我们就有：

$$\hat{q}_i - \hat{q}_j = q_i - q_j + \varepsilon_q^{ij}, \quad \hat{p}_i - \hat{p}_j = p_i - p_j + \varepsilon_p^{ij}$$

这里 $\varepsilon_q^{ij} = \varepsilon_q^i - \varepsilon_q^j$ 和 $\varepsilon_p^{ij} = \varepsilon_p^i - \varepsilon_p^j$ 。

类似地，目标的位置和速度的估计为： $\hat{q}_t = q_t + \varepsilon_q^t$ 和 $\hat{p}_t = p_t + \varepsilon_p^t$ ，其中 ε_q^t 和 ε_p^t 分别为位置和速度测量误差，我们有：

$$\hat{q}_i - \hat{q}_t = q_i - q_t + \varepsilon_q^{it}, \quad \hat{p}_i - \hat{p}_t = p_i - p_t + \varepsilon_p^{it}$$

这里 $\varepsilon_q^{ii} = \varepsilon_q^i - \varepsilon_q^i$ 和 $\varepsilon_p^{ii} = \varepsilon_p^i - \varepsilon_p^i$ 。

如果噪声是有界的，在嘈杂环境中保持连接性的一种可能方法是减缩网络的尺寸。我们假设噪声满足 $\|\varepsilon_q^i\| \leq r_w$ ，如图 3 所示。

令 $d_a = \|q_i - q_j\|$ ，为机体 i 和机体 j 间的实际距离，这样为了保持机体间的连接性并且机体间没有碰撞，需满足：

$$0 < d_a \leq r \quad (37)$$

令 \hat{d}_a 为实际距离 d_a 的估计，则我们有：

$$\begin{aligned} \hat{d}_a &= \|\hat{q}_i - \hat{q}_j\| \leq \\ &\|q_i - q_j\| + \|\varepsilon_q^{ij}\| \end{aligned} \quad (38)$$

由于 $\|\varepsilon_q^i\| \leq r_w$ ，我们有 $\|\varepsilon_q^{ij}\| \leq 2r_w$ ，可得：

$$\|q_i - q_j\| - 2r_w \leq \hat{d}_a \leq \|q_i - q_j\| + 2r_w \quad (39)$$

利用 $\|q_i - q_j\| = d_a$ ，可得：

$$d_a - 2r_w \leq \hat{d}_a \leq d_a + 2r_w \quad (40)$$

或者

$$\hat{d}_a - 2r_w \leq d_a \leq \hat{d}_a + 2r_w \quad (41)$$

由于控制算法 (22) 保证了 \hat{d}_a 收敛于期望的距离 d ，由式 (41) 可得：

$$d - 2r_w \leq d_a \leq d + 2r_w \quad (42)$$

从式 (37) 和式 (42) 可得：

$$\begin{cases} d - 2r_w > 0 \\ d + 2r_w \leq r \end{cases} \quad (43)$$

这样从式 (43) 得到 d 为：

$$2r_w < d \leq r - 2r_w \quad (44)$$

式 (44) 表明需要在范围 $(2r_w, r - 2r_w)$ 内设计距离 d ，以保持机体间的连接性和机体间没有碰撞发生。而如果我们选择 d 小于 $r - 2r_w$ ，则每一个机体将拥有比所需要的更多的临近机体。这样，我们选择 $d = r - 2r_w$ 。

现在，从式 (5) 中我们得到 d_{new}^a 为：

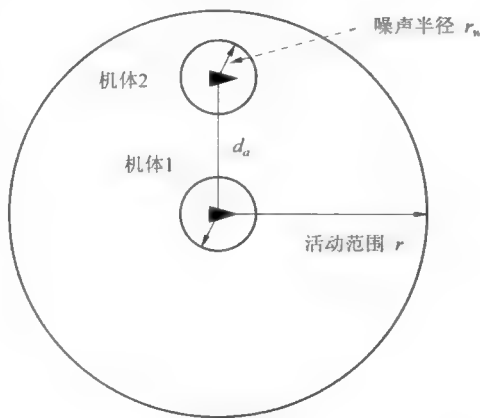


图 3 由于估计距离 \hat{d}_a 小于活动范围 r ，机体 2 被认为是机体 1 的临近机体

$$d_{\text{new}}^{\alpha} = \|d\|_{\sigma} = \frac{1}{\varepsilon} [\sqrt{1 + \varepsilon(r - 2r_w)^2} - 1] \quad (45)$$

从式 (8) 中我们得到一个新的作用函数 $\phi_{\alpha}^{\text{new}}(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_{\sigma})$ 为:

$$\phi_{\alpha}^{\text{new}}(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_{\sigma}) = \rho_h(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_{\sigma}/r_{\alpha})\phi(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_{\sigma} - d_{\text{new}}^{\alpha}) \quad (46)$$

从式 (36) 我们得到每一个机体 i 的位置和速度的含有噪声的局域平均 \hat{q}_i 和 \hat{p}_i , 其可计算为:

$$\begin{cases} \hat{q}_i = \frac{1}{|N_i^{\alpha}| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^{\alpha} \cup i|} \hat{q}_j \\ \hat{p}_i = \frac{1}{|N_i^{\alpha}| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^{\alpha} \cup i|} \hat{p}_j \end{cases} \quad (47)$$

从式 (10) 和式 (11) 我们得到 \hat{n}_{ij} 和 $\hat{a}_{ij}(q)$ 为:

$$\hat{n}_{ij} = (\hat{q}_j - \hat{q}_i) / \sqrt{1 + \varepsilon \|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|^2} \quad (48)$$

$$\hat{a}_{ij}(q) = \begin{cases} \rho_h(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_{\sigma}/r_{\alpha}), & j \neq i \\ 0, & j = i \end{cases} \quad (49)$$

这时, 我们提出含有 d_{new}^{α} 的多 CoM 收缩算法为:

$$\begin{aligned} u_i &= c_1^{\alpha} \sum_{j \in N_i^{\alpha}} \phi_{\alpha}^{\text{new}}(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_{\sigma}) \hat{n}_{ij} + c_2^{\alpha} \sum_{j \in N_i^{\alpha}} \hat{a}_{ij}(q) (\hat{p}_j - \hat{p}_i) - \\ &c_1^l (\hat{q}_i - \hat{q}_i) - c_2^l (\hat{p}_i - \hat{p}_i) - c_1^l (\hat{q}_i - \hat{q}_i) - c_2^l (\hat{p}_i - \hat{p}_i) \end{aligned} \quad (50)$$

4.2 多 CoM 聚集算法

本子节中我们描述多 CoM 聚集算法, 多 CoM 聚集算法的主要思想是每一个机体都应拥有一个与网络间较强的聚集力, 从而保持连接性。基于此, 我们介绍每一个机体位置和速度的聚集反馈。

在提出算法前, 首先进行如下定义:

$d_{il} = q_i - \bar{q}_i$, 为节点 i 与其位置局域平均之间的相对距离,

$v_{il} = p_i - \bar{p}_i$, 为节点 i 与其速度局域平均之间的相对速度,

而由于机体 i 在感受其自身的位置和速度过程中存在噪声, 这样估计

\hat{d}_{il} 和 \hat{v}_{il} 同样受到噪声 ($\varepsilon_d^i, \varepsilon_v^i$) 的干扰:

$$\begin{cases} \hat{d}_{il} = \hat{q}_i - \hat{\bar{q}}_i = q_i + \varepsilon_q^i - (\bar{q}_i + \bar{\varepsilon}_q^i) = d_{il} + \varepsilon_d^i \\ \hat{v}_{il} = \hat{p}_i - \hat{\bar{p}}_i = p_i + \varepsilon_p^i - (\bar{p}_i + \bar{\varepsilon}_p^i) = v_{il} + \varepsilon_v^i \end{cases} \quad (51)$$

这里 $\varepsilon_d^i = \varepsilon_q^i - \bar{\varepsilon}_q^i$, 其中 $\bar{\varepsilon}_q^i = \frac{1}{|N_i^{\alpha}| + 1} \sum_{i=1}^{|N_i^{\alpha} \cup i|} \varepsilon_q^i$;

而且 $\varepsilon_p^i = \varepsilon_p^i - \bar{\varepsilon}_p^i$, 其中 $\bar{\varepsilon}_p^i = \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{i=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} \varepsilon_p^i$

基于上述定义, 我们设计嘈杂环境中的分布式集群控制律——多 CoM 聚集算法:

$$\begin{aligned} u_i = & c_1^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_\sigma) \hat{n}_{ij} + c_2^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \hat{a}_{ij}(q)(\hat{p}_j - \hat{p}_i) - \\ & c_{\text{pos}} \hat{d}_{il} - c_{\text{ve}} \hat{v}_{il} - c_1^i(\hat{q}_i - \hat{q}_t) - c_2^i(\hat{p}_i - \hat{p}_t) - c_1^i(\hat{\bar{q}}_i - \hat{q}_t) - c_2^i(\hat{\bar{p}}_i - \hat{p}_t) \end{aligned} \quad (52)$$

其中 $\hat{d}_{il}, \hat{v}_{il}$ 分别为 d_{il} 和 v_{il} 的估计; c_{pos} 和 c_{ve} 为正常数。项 $-c_{\text{pos}} \hat{d}_{il}$ 和 $-c_{\text{ve}} \hat{v}_{il}$ 分别称为聚集反馈的局域位置和速度。这些负反馈的作用是保持位置和速度的聚集, 这就意味着每一个机体在嘈杂环境中总是试图保持接近位置的局域平均, 并最小化其速度和局域平均速度之间的速度错配。

在该算法中, 为了使后续的稳定分析更简单, 我们没有给出障碍物避免项。而在实际的应用中, 为了使得每一个机体能够避开静态和动态的障碍物, 只需在控制算法(式(52))中加入第二组成部分(式(14))。一般情况下, 这一部分不会影响整个系统的总体稳定性和特性。

5 稳定性分析

5.1 适应性集群的稳定性分析

通过应用控制律(34), 在自由空间和障碍物空间中, 网络中所有移动机体的位置和速度的 CoM (在式(28)中定义)将以指数规律向目标收敛。此外, 在目标追踪过程中将维持成形(移动机体间的自由碰撞和速度匹配)。

我们分别考虑自由空间中和障碍物空间中的适应性集群控制。

案例1(自由空间): 在自由空间中, $\sum_{k \in N_i^\beta} \phi_\beta(\|\hat{q}_{t,k} - q_i\|_\sigma) = 0$, 这样, 可以通过忽略常数 c_η^v ($\forall \eta = 1, 2$ 且 $v = \alpha, \beta$) 将控制律(34)重新写为:

$$\begin{aligned} u_i = & - \sum_{j \in N_i^\alpha} \nabla_{q_i} \psi_\alpha(\|q_j - q_i\|_\sigma) + \sum_{j \in N_i^\alpha} a_{ij}(q)(p_j - p_i) - \\ & c_1^i(q_i - q_t) - c_2^i(p_i - p_t) \end{aligned} \quad (53)$$

其中 $\psi_\alpha(z) = \int_{d_\alpha}^z \phi_\alpha(s) ds$, 为一对吸引/排斥势函数。考虑 $(\psi_\alpha, a(q))$ 的对

称性,从式(53)中可得到控制律 u 的平均为:

$$\bar{u} = -c_1'(\bar{q} - q_i) - c_2'(\bar{p} - p_i) \quad (54)$$

式(54)表明:

$$\begin{cases} \dot{\bar{q}} = \bar{p} \\ \dot{\bar{p}} = -c_1'(\bar{q} - q_i) - c_2'(\bar{p} - p_i) \end{cases} \quad (55)$$

式(55)的解表明位置和速度的 CoM 呈指数规律收敛于目标。

由于在这种条件下考虑了基于梯度项和一致项,所以在自由空间追踪中保持了队形(移动机体间没有碰撞和速度匹配)(详见文献[2])。

案例2(障碍物空间):在障碍物空间中,当每一个机体感受到障碍物时,设计为 d_i^a 减小。所以,当机体网络需要穿过两障碍物之间的狭窄空间时,其尺寸将逐渐减缩,而当网络已经穿过该狭窄空间时,它将逐渐增回至其原来的尺寸。这将减小障碍物对网络的影响,从而能够保持机体的速度,或者使 CoM 能够保持追踪目标。同样,在该场景中也能够保持连接性和相似的队形。

5.2 嘈杂环境中集群的稳定性分析

在分析集群控制算法多 CoM 聚集的稳定性前,下一小节中我们建立嘈杂环境中集群系统的误差动态模型。

5.2.1 误差动态模型

为了研究稳定性特性,我们有如下的系统误差动力学:

$$\begin{cases} \dot{d}_{ig} = v_{ig} \\ \dot{v}_{ig} = u_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_j = u_i - \bar{u}, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (56)$$

其中 $\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_j$ 。

进行如下定义:

$d_{ig} = q_i - \bar{q}$, 为节点 i 与其总体平均之间的相对距离,
 $v_{ig} = p_i - \bar{p}$, 为节点 i 与其总体平均之间的相对速度,
 可以得到如下关系式:

$$d_{il} = q_i - \bar{q}_i = d_{ig} + \bar{q} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} q_j$$

$$= d_{ig} + \bar{q} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} (d_{jg} + \bar{q}) = d_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_{jg} \quad (57)$$

与 d_{il} 类似, 得到的 v_{il} 如下:

$$v_{il} = v_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} v_{jg} \quad (58)$$

可分别将式 (47) 中位置和速度的局域平均估计重新写为:

$$\hat{\bar{q}}_i = q_i - d_{ig} + \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_{jg} + \bar{\mathcal{E}}_q^i \quad (59)$$

$$\hat{\bar{p}}_i = p_i - v_{ig} + \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} v_{jg} + \bar{\mathcal{E}}_p^i \quad (60)$$

考虑式 (51)、式 (59) 和式 (60), 将控制律 (52) 重新写为:

$$\begin{aligned} u_i = & c_1^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_\sigma) \hat{n}_{ij} + c_2^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \hat{a}_{ij}(q) (\hat{p}_j - \hat{p}_i) + \\ & (c_1^l - c_{\text{pos}}) \left(d_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_{jg} \right) + (c_2^l - c_{\text{ve}}) \left(v_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} v_{jg} \right) - \\ & (c_1^l + c_1^l) (q_i - q_i) - (c_2^l + c_2^l) (p_i - p_i) - c_{\text{pos}} \mathcal{E}_d^i - c_{\text{ve}} \mathcal{E}_v^i - c_1^l \bar{\mathcal{E}}_q^i - c_2^l \bar{\mathcal{E}}_p^i - \\ & (c_1^l + c_1^l) \mathcal{E}_q^i - (c_2^l + c_2^l) \mathcal{E}_p^i \end{aligned} \quad (61)$$

混合系统控制律的平均为:

$$\begin{aligned} \bar{u} = & \frac{c_1^\alpha}{n} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_\sigma) \hat{n}_{ij} \right] + \frac{c_2^\alpha}{n} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j \in N_i^\alpha} \hat{a}_{ij}(q) (\hat{p}_j - \hat{p}_i) \right] + \\ & \left(\frac{c_1^l - c_{\text{pos}}}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(d_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_{jg} \right) + \\ & \left(\frac{c_2^l - c_{\text{ve}}}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(v_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} v_{jg} \right) - \\ & \left(\frac{c_1^l + c_1^l}{n} \right) \sum_{i=1}^n (q_i - q_i) - \left(\frac{c_2^l + c_2^l}{n} \right) \sum_{i=1}^n (p_i - p_i) - \\ & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [c_{\text{pos}} \mathcal{E}_d^i + c_{\text{ve}} \mathcal{E}_v^i + c_1^l \bar{\mathcal{E}}_q^i + c_2^l \bar{\mathcal{E}}_p^i + (c_1^l + c_1^l) \mathcal{E}_q^i + (c_2^l + c_2^l) \mathcal{E}_p^i] \end{aligned} \quad (62)$$

将式 (61) 中的 u_i 和式 (62) 中的 \bar{u} 代入式 (56) 中, 得到:

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{ig} = & c_1^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_\sigma) \hat{n}_{ij} - \frac{c_1^\alpha}{n} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_\sigma) \hat{n}_{ij} \right] + \\
& c_2^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \hat{a}_{ij}(q) (\hat{p}_j - \hat{p}_i) - \frac{c_2^\alpha}{n} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j \in N_i^\alpha} \hat{a}_{ij}(q) (\hat{p}_j - \hat{p}_i) \right] - \\
& \left(\frac{c_1^l - c_{\text{pos}}}{|N_i^\alpha| + 1} \right) \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_{jg} - \left(\frac{c_2^l - c_{\text{ve}}}{|N_i^\alpha| + 1} \right) \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} v_{jg} - \\
& \left(\frac{c_1^l - c_{\text{pos}}}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(d_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_{jg} \right) - \\
& \left(\frac{c_2^l - c_{\text{ve}}}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(v_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} v_{jg} \right) - \\
& (c_{\text{pos}} - c_1^l) d_{ig} - (c_{\text{ve}} - c_2^l) v_{ig} - (c_1^l + c_1^l) d_{ig} - (c_2^l + c_2^l) v_{ig} - \\
& c_{\text{pos}} \mathcal{E}_d^i - c_{\text{ve}} \mathcal{E}_v^i - c_1^l \bar{\mathcal{E}}_q^i - c_2^l \bar{\mathcal{E}}_p^i - (c_1^l + c_1^l) \mathcal{E}_q^i - (c_2^l + c_2^l) \mathcal{E}_p^i + \\
& \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [c_{\text{pos}} \mathcal{E}_d^i + c_{\text{ve}} \mathcal{E}_v^i + c_1^l \bar{\mathcal{E}}_q^i + c_2^l \bar{\mathcal{E}}_p^i + (c_1^l + c_1^l) \mathcal{E}_q^i + (c_2^l + c_2^l) \mathcal{E}_p^i] \\
= & -(c_1^l + c_{\text{pos}}) d_{ig} - (c_2^l + c_{\text{ve}}) v_{ig} + \Phi_i + \Omega_i(V) + \zeta_i \tag{63}
\end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned}
\Phi_i = & c_1^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_\sigma) \hat{n}_{ij} - \frac{c_1^\alpha}{n} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j \in N_i^\alpha} \phi_\alpha(\|\hat{q}_j - \hat{q}_i\|_\sigma) \hat{n}_{ij} \right] + \\
& c_2^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \hat{a}_{ij}(q) (\hat{p}_j - \hat{p}_i) - \frac{c_2^\alpha}{n} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j \in N_i^\alpha} \hat{a}_{ij}(q) (\hat{p}_j - \hat{p}_i) \right] \\
\Omega_i(V) = & - \left(\frac{c_1^l - c_{\text{pos}}}{|N_i^\alpha| + 1} \right) \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_{jg} - \left(\frac{c_2^l - c_{\text{ve}}}{|N_i^\alpha| + 1} \right) \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} v_{jg} - \\
& \left(\frac{c_1^l - c_{\text{pos}}}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(d_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} d_{jg} \right) - \\
& \left(\frac{c_2^l - c_{\text{ve}}}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(v_{ig} - \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{j=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} v_{jg} \right) \\
\zeta_i = & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [c_{\text{pos}} \mathcal{E}_d^i + c_{\text{ve}} \mathcal{E}_v^i + c_1^l \bar{\mathcal{E}}_q^i + c_2^l \bar{\mathcal{E}}_p^i + (c_1^l + c_1^l) \mathcal{E}_q^i + (c_2^l + c_2^l) \mathcal{E}_p^i] - \\
& [c_{\text{pos}} \mathcal{E}_d^i + c_{\text{ve}} \mathcal{E}_v^i + c_1^l \bar{\mathcal{E}}_q^i + c_2^l \bar{\mathcal{E}}_p^i + (c_1^l + c_1^l) \mathcal{E}_q^i + (c_2^l + c_2^l) \mathcal{E}_p^i]
\end{aligned}$$

这里, 定义 $V_i = [d_{ig} v_{ig}]^T$, $V = [V_1, V_2, \dots, V_N]^T$ 。

在状态空间表示中, 将式 (63) 重新写为:

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_{ig} \\ \dot{v}_{ig} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ -k_1 I & -k_2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{ig} \\ v_{ig} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O \\ I \end{bmatrix} (\Phi_i + \Omega_i(V) + \zeta_i) \quad (64)$$

其中 $k_1 = (c'_1 + c_{\text{pos}})$; $k_2 = (c'_2 + c_{\text{ve}})$; I 为 $m \times m$ 的恒定矩阵。

这样可以将式 (64) 重新写为:

$$\dot{V}_i = \begin{bmatrix} O & I \\ -k_1 I & -k_2 I \end{bmatrix} V_i + \begin{bmatrix} O \\ I \end{bmatrix} (\Phi_i + \Omega_i(V) + \zeta_i) \quad (65)$$

令矩阵 $A_i = \begin{bmatrix} O & I \\ -k_1 I & -k_2 I \end{bmatrix}$, 则可得到特征方程为:

$$\det(\lambda I - A_i) = (\lambda^2 + k_2 \lambda + k_1)^m = 0 \quad (66)$$

由于 $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, 且如果 $k_2 < 2\sqrt{k_1}$, 则特征方程 (66) 的所有根具有负的虚部 ($\text{Re}(\lambda_i) < 0$)。

5.2.2 多 CoM 聚集算法的稳定性分析

本小节中, 我们基于 Lyapunov 方法分析嘈杂环境中多 CoM 聚集集群控制算法的稳定性。

假设机体感受到的位置和速度的误差与误差系统的状态幅值之间具有线性关系。这是因为如果两个机体彼此分离很远, 则检测误差通常会增加。这样就有:

$$\begin{cases} \|\varepsilon_d^i(t)\| \leq c_{ed1}^i \|V_i(t)\| + c_{ed2}^i \\ \|\varepsilon_v^i(t)\| \leq c_{ev1}^i \|V_i(t)\| + c_{ev2}^i, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (67)$$

同样假设目标追踪项上的噪声 ε_q^i 和 ε_p^i 限制为:

$$\begin{cases} \|\varepsilon_q^i(t)\| \leq c_{eq}^i \\ \|\varepsilon_p^i(t)\| \leq c_{ep}^i, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (68)$$

而位置和速度局域平均估计的噪声 $\bar{\varepsilon}_q^i$ 和 $\bar{\varepsilon}_p^i$ 限制为:

$$\begin{cases} \|\bar{\varepsilon}_q^i(t)\| \leq \bar{c}_{eq}^i \\ \|\bar{\varepsilon}_p^i(t)\| \leq \bar{c}_{ep}^i, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (69)$$

这样 $\bar{c}_{eq}^i = \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{i=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} c_{eq}^i$, $\bar{c}_{ep}^i = \frac{1}{|N_i^\alpha| + 1} \sum_{i=1}^{|N_i^\alpha \cup i|} c_{ep}^i$ 。

定理 考虑含有 n 个移动机体的系统, 其中的机体具有动力学 (1) 并由式 (52) 控制, 且所有的噪声由式 (67)、式 (68) 和式 (69) 限制。令

$$c_{pv}^1 = \frac{(c_{\text{pos}} + 1)^2 + c_{\text{ve}}^2}{2c_{\text{pos}}c_{\text{ve}}} + \sqrt{\left(\frac{c_{\text{pos}} + c_{\text{ve}}^2 - 1}{2c_{\text{pos}}c_{\text{ve}}}\right)^2 + \frac{1}{c_{\text{pos}}^2}}$$

且如果

$$c_{\text{pos}} c_{\text{ed}_1}^i + c_{\text{ve}} c_{\text{ev}_1}^i \leq \frac{1}{c_{\text{pv}}^i}$$

则参数满足

$$\sum_{j=1}^m \frac{2c_{\text{pv}}^i [\sqrt{(c_1^i - c_{\text{pos}})^2 + (c_2^i - c_{\text{ve}})^2} - \frac{1}{n}(c_{\text{pos}} c_{\text{ed}_1}^i + c_{\text{ve}} c_{\text{ev}_1}^i)]}{(1 - \varepsilon_i)[1 - c_{\text{pv}}^i(c_{\text{pos}} c_{\text{ed}_1}^i + c_{\text{ve}} c_{\text{ev}_1}^i)]} < 1$$

这样, 对于 $\forall i, 0 < \varepsilon_i < 1$, 从而限制了式 (65) 的轨迹。

证明: 为了研究误差动力学 (65) 的稳定性, 一种可能的选择是为每一个机体选择 Lyapunov 函数:

$$L_i(V_i) = V_i^T P V_i \quad (70)$$

这样, $P = P^T$, 为一个 $2m \times 2m$ 的正定矩阵 ($P > 0$), 从而可得混合系统的 Lyapunov 函数为:

$$L(V) = \sum_{i=1}^n V_i^T P V_i$$

由式 (70) 可得:

$$\dot{L}_i(V_i) = V_i^T P \dot{V}_i + \dot{V}_i^T P V_i \quad (71)$$

然后将式 (65) 中的 \dot{V}_i 代入式 (71) 中可得:

$$\begin{aligned} \dot{L}_i(V_i) &= V_i^T (P A_i + A_i^T P) V_i + 2 V_i^T P B [\Phi_i + \Omega_i(V) + \zeta_i] \\ &= -V_i^T C V_i + 2 V_i^T P B [\Phi_i + \Omega_i(V) + \zeta_i] \end{aligned}$$

其中 $B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$, 且 $C = -(P A_i + A_i^T P)$ 。

该证明中的其他部分是为了表明 $\dot{L}_i(V_i) < 0$, $\dot{L}_i(V_i) < 0$ 的详细证明过程类似于文献 [14] 中的内容。

6 实验结果

本节中我们将测试所提出的算法、适应性集群控制、多 CoM 收缩和多 CoM 聚集, 然后将我们的算法与现有的算法 (22) 在连接性、队形和追踪性能上进行比较。在接下来的小节中, 我们首先讨论如何评估网络的连接性。

6.1 连接性评估

为了评估网络的连接性, 我们首先已知如果节点 i 和节点 j 之间的距离满足 $0 < \|q_i - q_j\| \leq r$, 则它们之间的连接将会保持, 否则它们之间的连

接将会断开 对于图的连接性: 如果在时刻 t 在任何两顶点之间存在路径, 则动态图 $G(\mathcal{D}, E)$ 是连接的。

为了分析网络的连接性, 我们定义连接矩阵 $[c_{ij}(t)]$ 为:

$$[c_{ij}(t)] = \begin{cases} 1, & j \in N_i^a(t), i \neq j \\ 0, & j \notin N_i^a(t), i \neq j \end{cases}$$

且 $c_{ii} = 0$ 。

由于一个 n 阶连接图 $[c_{ij}(t)]$ 的拉普拉斯算子的阶数至多为 $(n-1)$ 或者 $\text{rank}([c_{ij}(t)]) \leq (n-1)$, 所以在时刻 t 网络的相对连接性定义为 $C(t) = \frac{1}{n-1} \text{rank}([c_{ij}(t)])$ 。

如果 $0 \leq C(t) < 1$, 网络将断开, 而如果 $C(t) = 1$, 网络是连接的。基于这种衡量标准, 我们就可以在所提出的集群控制算法中评估网络连接性。

6.2 喧嚣环境中的适应性集群结果

在适应性集群的仿真和实验中使用的参数如下:

——仿真中的集群参数: 机体数量 = 50 (在尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的盒子中随机分布); $a = b = 5$; 活动范围 $r = 8.5$; 期望距离 $d = 7$; 对于 σ 规范, $\varepsilon = 0.1$; 对于碰撞函数 $(\phi_\alpha(z), \phi'_\alpha(z))$, $h = 0.2$; 对于碰撞函数 $(\phi_\beta(z))$, $h = 0.9$ 。

仿真中的目标移动参数: 目标按直线轨迹移动: $\mathbf{q}_t = [100 + 130t, t]^T$ 。

——实验中的集群参数:

机体数量 = 7 (随机分布); $a = b = 5$; $d = 1 \text{ } 100 \text{ mm}$; 比例系数 $k_c = 1.2$; 活动范围 $r = k_c \times d$; 对于 σ 规范, $\varepsilon = 0.1$; 对于碰撞函数 $(\phi_\alpha(z), \phi'_\alpha(z))$, $h = 0.2$; 对于碰撞函数 $(\phi_\beta(z))$, $h = 0.9$ 。

——实验中的目标移动参数: 目标按直线轨迹移动: $\mathbf{q}_t = [230 + t, -3 \text{ } 000 + 130t]^T$ 。

——实验装置: 本实验中我们使用 7 个 Rovio 机器人^[15], 它们具有全方位的运动能力, 这些机器人可在 6 个方向上自由移动。Rovio 机器人的动态模型可以由方程 (1) 来估计, 但 Rovio 机器人的定位精度较低, 而且机器人没有任何感知设备来检测其临近机器人或者障碍物的姿态 (位置和速度)。所以实验中 (见图 4) 我们使用一种 VICON 运动捕捉系统装置^[16], 它包括 12 个红外摄像机来追踪移动目标, 该追踪系统可以较高的精度提供每一个移动物体的位置和速度。

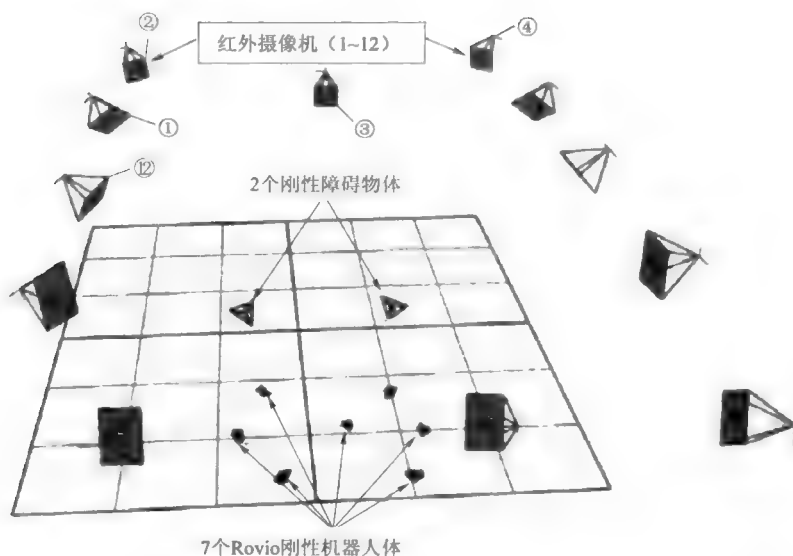


图4 实验装置

图5表示使用现有的集群控制算法(21)直线轨迹中的移动目标(红色/深色线)追踪结果。图6为使用适应性集群控制算法(34)直线轨迹中的移动目标(红色/深色线)追踪结果。图7分别为两种集群控制算法(34)和(22)的CoM(黑色/较深颜色的直线)与目标((c), (c)') (追踪性能)之间机体间的速度匹配((a), (a)')、连接性((b), (b)')和定位误差的结果。为了比较这些算法,我们使用移动机体的相同的初始状态(位置和速度)。通过比较这些图线我们发现,适应性集群控制算法(34)的应用使得在网络穿过两障碍物(两红色/深色圆)间的狭小空间时仍然保持连接性、相似的队形和追踪性能,而现有的集群控制算法(22)

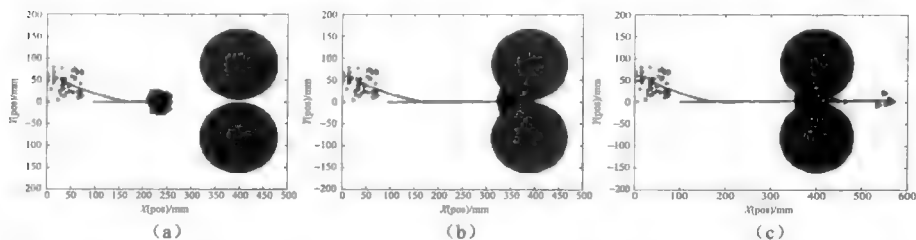


图5 移动机体网络的快照图。图(a)为移动机体形成网络时;图(b)为移动机体避开障碍物时;图(c)为移动机体在两障碍物间的狭小空间内阻塞。这些结果在使用算法(22)后得到(见书后p.7彩图5)

并不能处理这些问题。在图 6 中, 当网络进入两障碍物之间的狭小间隙时, 其尺寸逐渐减缩以穿过该空间, 当它穿过狭小空间后, 其网络尺寸又逐渐恢复, 从而保持了连接性和相似的队形。

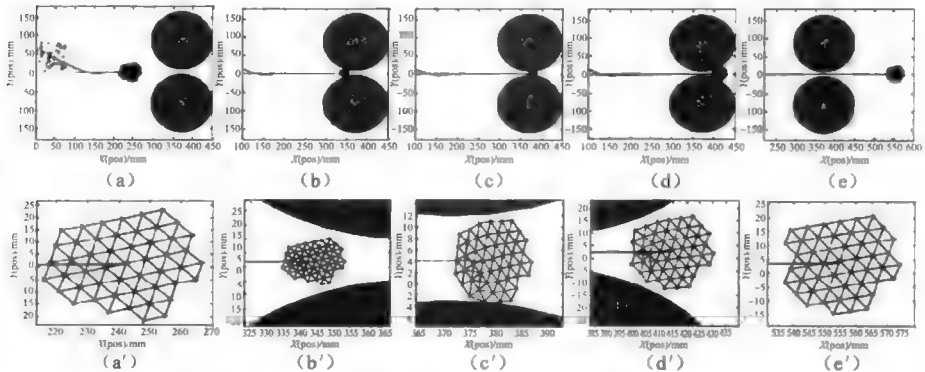


图 6 移动机体网络的快照图。图 (a) 为移动机体形成网络时; 图 (b)、图 (c) 为移动机体网络减缩以避免障碍物; 图 (d) 为移动机体成功穿过两障碍物间的狭窄空间; 图 (e) 为移动机体恢复至其原来的尺寸, 图 (a') ~ 图 (e') 分别为图 (a) ~ 图 (e) 的放大图 这些结果经使用我们的集群控制算法 (34) 得到 (见书后 p. 7 彩图 6)

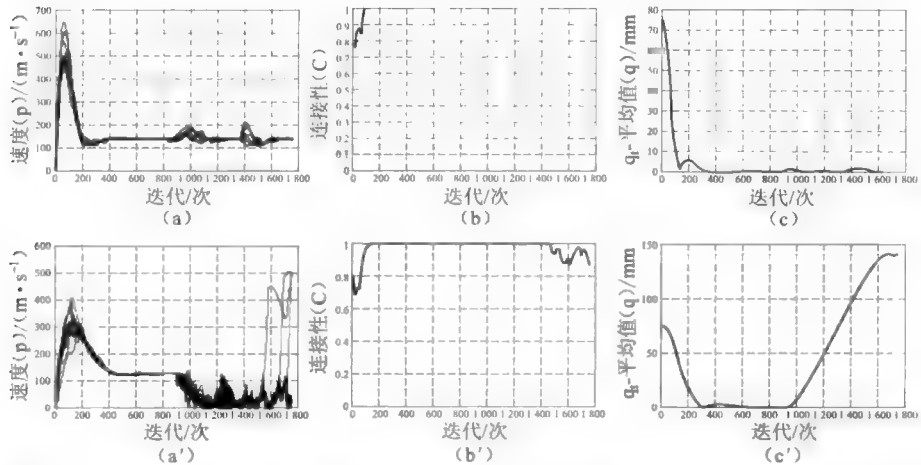


图 7 图 (a) ~ 图 (c) 为使用我们的适应性集群控制算法的 CoM 与移动目标之间机体间的速度匹配、连接性和定位误差, 图 (a') ~ 图 (c') 为使用算法 (22) 的相应结果

图 8 为使用我们的适应性集群控制算法 (34) 时 7 个 Rovio 机器人实验结果的快照图 (图 8 (a) ~ 图 8 (f)), 该图与图 6 中的仿真结果类似。图 9 (左图) 为仿真中 7 个机器人的轨迹, 图 9 (右图) 为仿真和实验中 7 个机

器人轨迹的比较。



图8 使用我们的适应性集群控制算法 (34) 时 7 个 Rovio 机器人适应性集群控制的快照图 图 (a) 中, 7 个机器人随机分布; 图 (b) 中, 7 个机器人形成点阵队形; 图 (c) 中, 7 个机器人开始减缩其网络的尺寸; 图 (d) 中, 7 个机器人穿过两个障碍物间的狭窄空间; 图 (e) 中, 7 个机器人开始恢复其网络的尺寸; 图 (f) 中, 7 个机器人完全恢复了其网络尺寸 (见书后 p. 7 彩图 8)

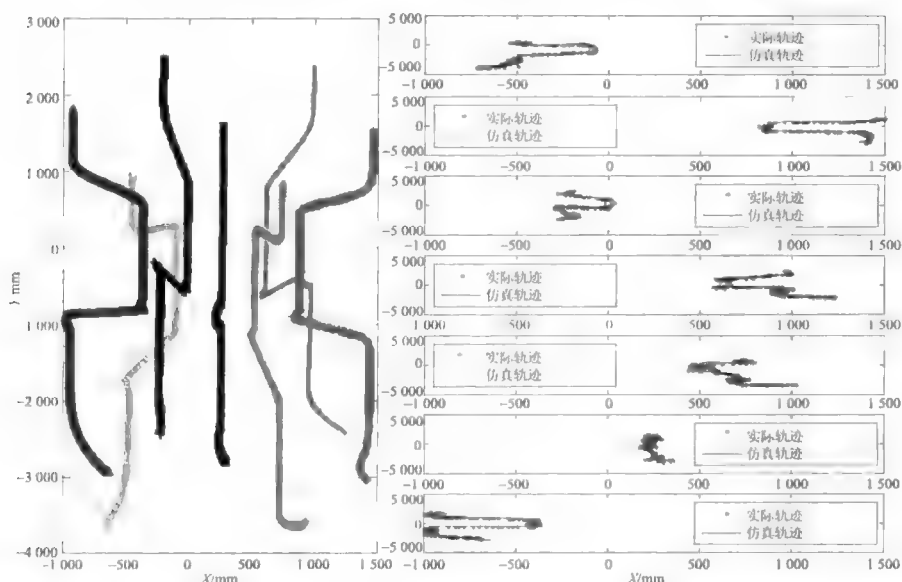


图9 使用适应性集群控制算法 (34) 得到的 7 个机器人的轨迹 (见书后 p. 8 彩图 9)

6.3 嘈杂环境中的集群结果

仿真中使用的参数如下:

——集群参数: 机体数量 = 50 (在尺寸为 120 mm × 120 mm 的方形区域中随机分布); $a = b = 5$; 活动范围 $r = 19$; 对于 σ 规范, $\varepsilon = 0.1$; 对于碰撞函数 ($\phi_a^{\text{new}}(z), \phi_a(z)$), $h = 0.2$; 对于碰撞函数 ($\phi_p(z)$), $h = 0.9$ 。对于算法 (22) 和多 CoM 聚集算法, 期望距离 $d = 16$; 对于多 CoM 减缩算法, $r_w = 3.4$, 这样 $d = r - 2r_w = 19 - 2 \times 3.4 = 12.2$ 。

——目标移动参数:

情况 1: 目标按正弦波轨迹移动: $q_t = [50 + 50t, 295 - 50\sin t]^T$, $0 \leq t \leq 6$ 。

情况 2: 目标按圆形轨迹移动: $q_t = [310 - 160\cos t', 255 + 160\sin t']^T$, $0 \leq t \leq 4$ 。

——仿真中使用的噪声为 Gaussian 噪声, 其平均值为零, 方差为 1。

图 10 和图 11 分别为在嘈杂环境中使用算法 (22)、多 CoM 减缩和多 CoM 聚集算法的正弦波和圆形轨迹的移动目标 (红色/深色线) 追踪结果。特别地, 图 10 (a) ~ 图 10 (d) 和图 11 (a) ~ 图 11 (d) 为集群控制算法 (22) 的结果, 图 10 (e) ~ 图 10 (h) 和图 11 (e) ~ 图 11 (h) 为所提出的集群控制算法多 CoM 减缩算法的结果, 图 10 (i) ~ 图 10 (l) 和图 11 (i) ~ 图 11 (l) 为所提出的集群控制算法多 CoM 聚集算法的结果。

为了将我们提出的集群控制算法——多 CoM 减缩和多 CoM 聚集算法与现有的集群算法 (22) 进行比较, 我们使用移动机体相同的初始状态 (位置和速度)。图 12 分别为追踪性能和连接性的结果: 图 (a)、图 (c) 为集群控制算法 (22) 的结果, 图 (b)、图 (d) 为多 CoM 减缩集群控制算法的结果, 图 (e)、图 (f) 为多 CoM 聚集集群控制算法的结果。比较这些图中的结果, 我们可以很明显地看出:

- 对于集群控制算法 (22): 追踪性能具有较大的误差, 它使目标移出网络的中心; 此外, 失去了连接性, 或网络断开 ($C(t) < 1$)。
- 对于多 CoM 聚集算法: 追踪性能具有较小的误差; 此外, 机体能够迅速形成网络 (只需 5 步迭代), 并保持连接性 ($C(t) = 1$)。
- 对于多 CoM 减缩算法: 追踪性能同样具有较小的误差, 在 6 步迭代后保持了连接性。而网络的尺寸小于多 CoM 聚集集群控制算法的网络尺寸, 且由于每一个机体总是试图减小与其临近机体间的距离以保持它们的连接性, 所以这里每一个机体具有更多的临近机体。

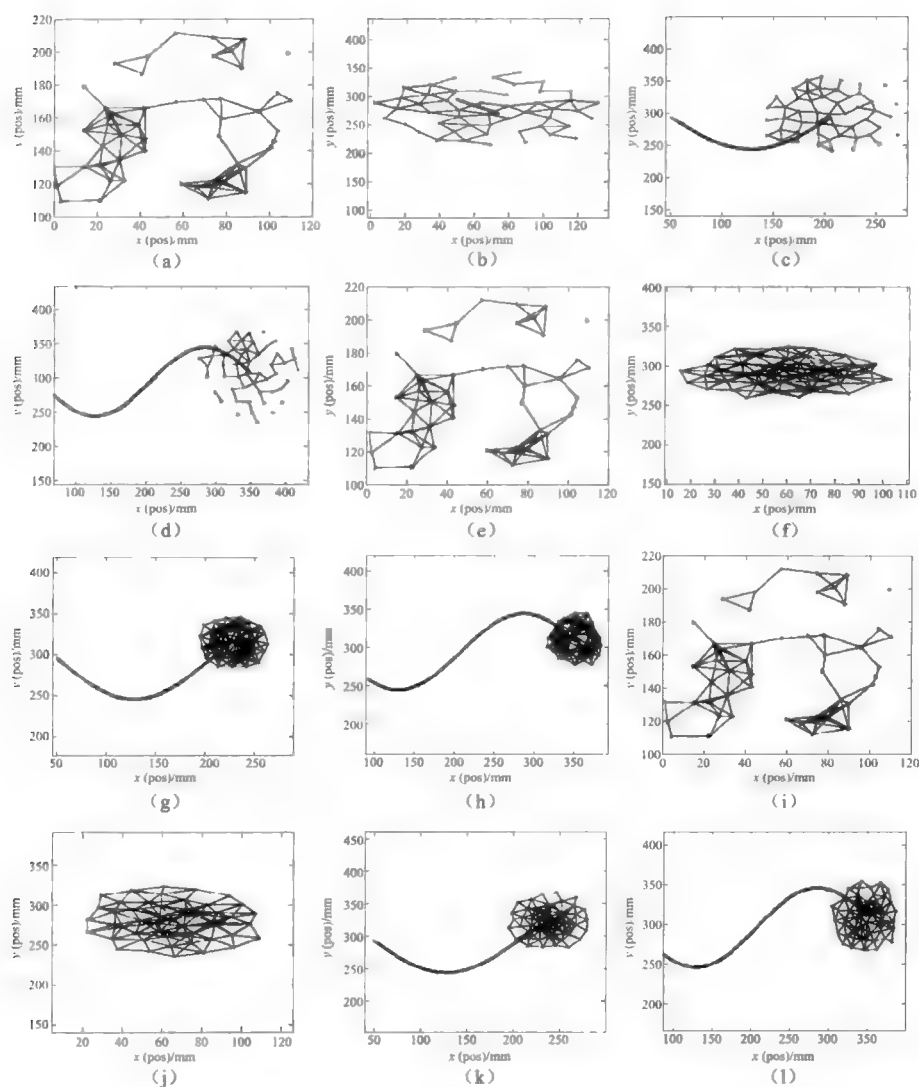


图10 目标以正弦波轨迹(图(b)~图(d);图(f)~图(h);图(j)~图(l))移动时,机体随机分布(图(a)~图(i)),形成网络和追踪目标(红色/深色线)的快照图。其中图(a)~图(d)为集群控制算法(22)的结果;图(e)~图(h)为多CoM减缩算法的结果;图(i)~图(l)为多CoM聚集算法的结果

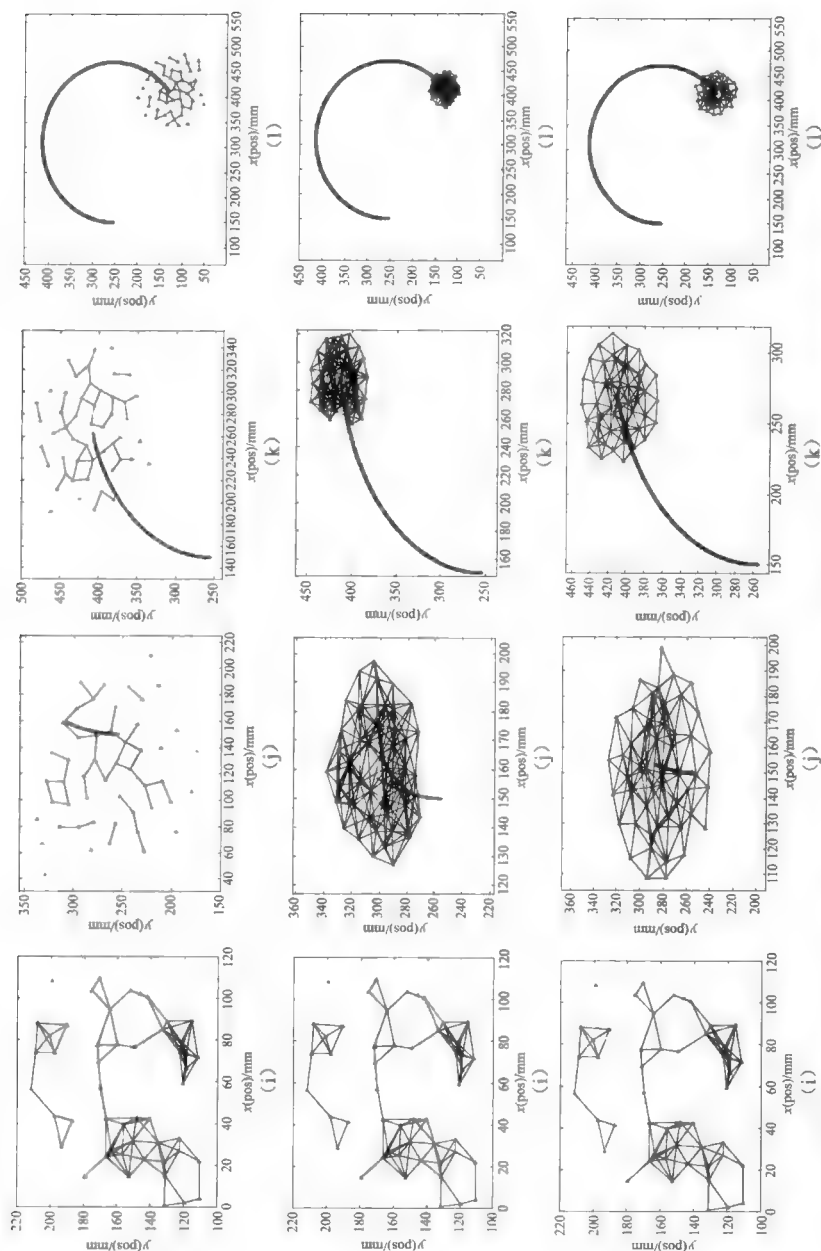


图11 如图(b)~图(d)、图(f)~图(h)、图(j)~图(l)所示,目标以圆形轨迹所示移动时,机体随机分布(见图(a)、图(e)、图(i)),形成网络和追踪目标(红色/深色线)的快照图。其中,图(a)~图(d)为集群控制算法(22)的结果,图(e)~图(h)为多CoM减缩算法的结果,图(i)~图(l)为多CoM聚集算法的结果

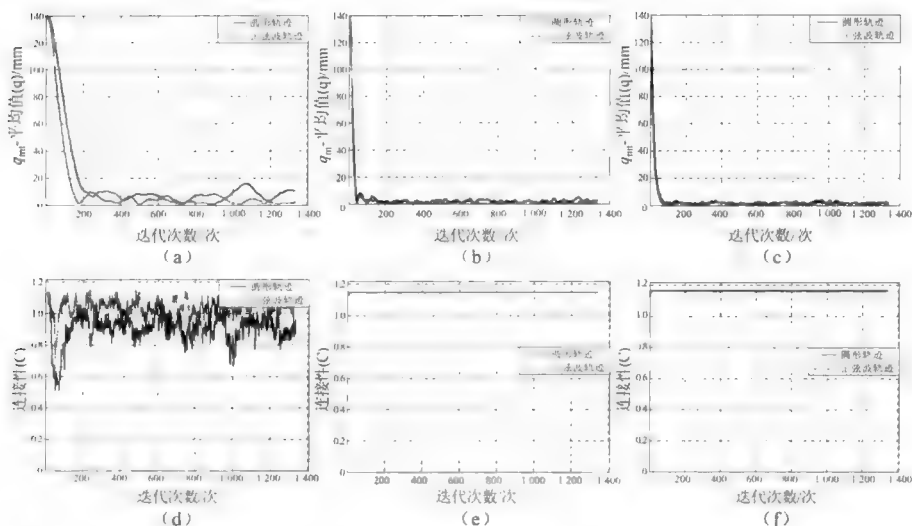


图 12 追踪性能结果 (CoM 与目标位置间的误差): 图 (a) 为算法 (22) 的结果; 图 (b) 为多 CoM 减缩算法的结果; 图 (c) 为多 CoM 聚集算法的结果. 连接性由 $C(t)$ 进行评估: 图 (d) 为算法 (22) 的评估结果; 图 (e) 为多 CoM 减缩算法的评估结果; 图 (f) 为多 CoM 聚集算法的评估结果 (见书后 p. 8 彩图 12)

关于这些结果的更多详细内容参见视频文件, 这些结果的总结, 已在我们的 ASCC 网站上给出, <http://ascc.okstate.edu/projectshung.html>.

7 结论和未来的工作

本文中我们分别考虑了在喧嚣和嘈杂环境中控制一组移动机体追踪一个目标的问题。首先, 设计了一种适应性集群控制算法来使移动机体在喧嚣环境中能够更加有效地追踪并观察到移动目标, 同时保持它们相似的队形和连接性, 这就意味着网络中的所有移动机体都能够很接近地包围机体, 这将使得它们能够很容易地观察到目标从而便于识别。其次, 提出了嘈杂环境中的两种集群控制算法: 多 CoM 减缩算法和多 CoM 聚集算法。在多 CoM 减缩算法中, 我们的方法是通过减小机体间的距离来减小网络的尺寸; 在多 CoM 聚集算法中, 我们的方法是结合局部位置和速度的聚集反馈以处理噪声。基于 Lyapunov 方法, 我们研究了多 CoM 聚集算法的稳定性。文中还提出了网络的连接性, 并保证了在喧嚣和嘈杂环境中机体间能够避免碰撞。

参考文献

- [1] Tanner, H. G. , Jadbabai, A. , Pappas, G. J. : Flocking in fixed and switching networks. *IEEE Transactions on Automatic Control* 52 (5) , 863 – 868 (2007)
- [2] Olfati-Saber, R. : Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control* 51 (3) , 401 – 420 (2006)
- [3] Reynolds, C. : Flocks, birds, and schools: A distributed behavioral model. In: *Computer Graphics, ACM SIGGRAPH 1987 Conference Proceedings*, Anaheim California, vol. 21 (4) , pp. 25 – 34 (1987)
- [4] Levine, H. , Rappel, W. J. , Cohen, I. : Self-organization in systems of self-propelled particles. *Phys. Review. E* 63, 017101 – 017104 (2000)
- [5] Mogilner, A. , Edelstein-Keshet, L. , Bent, L. , Spiros, A. : Mutual interactions, potentials, and individual distance in a social aggregation. *J. Math. Biol* 47, 353 – 389 (2003)
- [6] Couzin, I. D. , Krause, J. , James, R. , Ruxton, G. D. , Franks, N. R. : Collective memory and spatial sorting in animal groups. *J. Theor. Biol* 218, 1 – 11 (2002)
- [7] Su, H. , Wang, X. , Lin, Z. : Flocking of multi-agents with a virtual leader. *IEEE Transactions on Automatic Control* 54 (2) , 293 – 307 (2009)
- [8] Olfati-Saber, R. : Distributed tracking for mobile sensor networks with information driven mobility. In: *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, pp. 4606 – 4612 (2007)
- [9] La, H. M. , Sheng, W. : Flocking control of a mobile sensor network to track and observe a moving target. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2009)
- [10] Ogren, P. , Fiorelli, E. , Leonard, N. E. : Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment. *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (8) , 1292 – 1302 (2006)
- [11] Olfati-Saber, R. , Murray, R. M. : Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (9) , 1520 – 1533 (2004)
- [12] Olfati-Saber, R. , Alex Fax, J. , Murray, R. M. : Consensus and cooperative in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE* 95 (1) , 215 – 233 (2007)
- [13] Leonard, N. E. , Fiorelli, E. : Virtual leaders, artificial potentials, and coordinated control of groups. In: *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2968 – 2973 (2001)
- [14] Liu, Y. , Passino, K. M. : Stable social foraging swarms in a noisy environment. *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (1) , 30 – 44 (2004)
- [15] Rovio robot, [http: //www. wowwee. com/en/support/rovio](http://www.wowwee.com/en/support/rovio)
- [16] VICON motion system, [http: //www. vicon. com/](http://www.vicon.com/)

第四章 遗传激励

Joshua Brandoff, Hiroki Sayama

Joshua Brandoff, 数学博物馆, e-mail: brandoff@momath.org

Hiroki Sayama, 复杂系统研究组, 集体动力学方向, Binghamton 大学, 纽约州立大学, e-mail: sayama@binghamton.edu

摘要: 长期以来, 人们一直研究并认识到激励对于群居昆虫间的自组织是一种有效的系统, 尽管使用了信息素这种化学制剂, 昆虫群体依然能够执行超过单个机体范围的复杂集体行为。科学家在开发具有相同稳健性的人造系统的努力中, 创建了基于信息素激励的人工模拟物, 但这些系统通常会受到可扩展性和复杂问题的困扰, 这些问题与信息素扩散物理学相关。在本章中, 介绍另一种称为“遗传激励”的激励框架。应用这种框架, 机体能够直接分享整个行为算法, 而不是局限于信息内容中的信息素追踪。该框架中使用的基因结构使新的研究途径得以开发, 包括实时进化和机体对复杂环境的适应性。进行的实验中使用了遗传激励作为模拟机器人群的一种间接的通信框架, 这些机器人群则是在一个未知环境中执行任务。机器人能够通过环保分布式无线射频识别卡共享它们的行为基因。研究发现, 那些使用图式激励其自身以采用较少的行为基因 (相应于开发策略中的新颖性) 的机器人, 通常比那些随机改变它们基因的机体更能覆盖更多的环境, 这就值得进一步地研究, 以开发其潜力。

1 背景: 自然和社会系统中的激励

“激励以做出努力”由 Pierre Huber 于 1810 年首次进行了描述 (Holl-dobler 和 Wilson, 2009), 并由 Pierre-Paul Grassé 在 1959 年进行了命名 (White, 2005), 它是机体间通过改变其局部环境进行的间接相互作用以实现集体行为的一种系统协调。与目前许多人造工程系统不同, 激励系统能够通过简单的局部相互作用进行自组织, 而不需要中央协调者的导引。激励依赖大量的互动反馈环路, 这些反馈环路定义了机体与环境在相互作用的影响下

如何变化（见图1）。

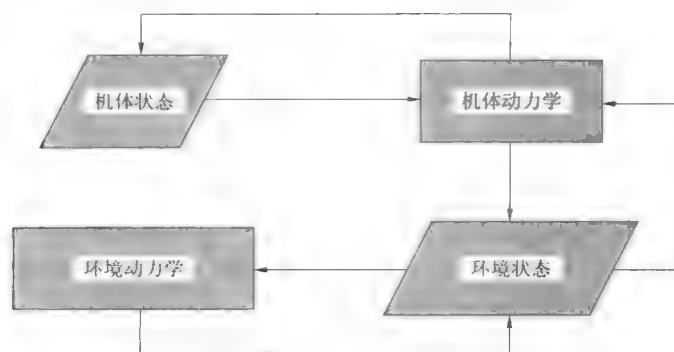


图1 描述激励过程中反馈环路的流程图（基于 Parunak (2006a), p. 164 中的图）

每一个机体都具有其内部和外部状态，且前者对于其他机体而言并不能被感知到。机体能够通过少量（通常）的传感器和执行器感知和改变它们的环境，对机体的导引由一控制器程序来实现，该程序根据检测到的局部环境和机体的内部状态改变机体的行为。此外，控制器程序本身可以由一个单独的程序进行导引，该单独程序改变机体的相互作用动力学，而这些动力学本身则是时间和它们内部信息的函数。

在自然界中，激励在群居昆虫中随处可见，它们在地球上已经存在了至少 5 000 万年。这些昆虫使用的通信信号有 90% 以上是通过一种称为信息素的化学物质实现的，这种信息素能够根据相同物种中其他昆虫的种类和强度引发出它们的多种行为（Holldobler 和 Wilson, 2009）。经过自然选择的过程，这些昆虫获得了创建简单“算法”的能力，这些算法使得能够使用信息素跟踪来集体实现有益的行为；而且这些集体行为是“最低的要求”，而不是自然界中的最优行为。将“满意”一词定义为一种适当的和令人满意的结果的实现，而不是最好结果的实现（Simon, 1956）。在自然界中，通常不可能得到实现全局最优解所必需的足量信息（比如在整个森林中寻找最好的食物源而不是“足够好的”食物源）。群居昆虫已经进化了激励通信来寻找最有效而不是最好的方法以完成任务。

由信息素可能引起的惊人的组织量，意味着群居昆虫群体能够起到一种超个体的作用。“超个体”一词是进化生物学家 E. O. Wilson 经常使用的（Holldobler 和 Wilson, 2009），它用来描述复杂的集体行为，比个体生物以更大的范围出现。在 Grassé 对激励进行正式介绍之前，这种集体行为在没有中央控制器的导引下被认为是不可能的。但此后它引起了科学家的兴趣，这

些科学家希望了解像信息素之类的局部刺激在空间和时间上如何组织以保证一种相干的自适应结构，并用来解释如果群居昆虫是通过群体所在环境中共同的介质而独立作用，那么它们如何对激励做出回应（White, 2005）。

激励在比如细菌、黏菌和鱼类等多种生物体中是很明显的（White, 2005），但人们对蚁群中激励的研究还处于起步阶段。蚁群具有一种内部“算法”，这些算法能够使它们基于当前的显现状态（比如面对亲人的尸体时）来改变它们所在的局部环境（绝大多数情况下是通过使用信息素来实现的）（Holldobler 和 Wilson, 2009）。蚂蚁物种中的黑蚁和大头蚁会通过信息素激励来建造墓地。如果死亡的蚂蚁起初在整个环境中随机分散，那在世蚁群将“嗅”到它们并开始聚集在一起（Dorigo、Bonabeau 和 Theraulaz, 2000）。这些聚集的出现是由于正的和负的反馈回路，而且是任何激励过程的内在部分（Holland 和 Melhuish, 1999; White, 2005）。蚂蚁会将更多的尸体放置在已经存在尸体的地方，因为较大集群的集体“嗅觉”吸引了在世的蚁群。这种聚集表明信息素较小的初始浓度差能够随着时间增长而放大。这种现象的另一个例子是在对蚂蚁觅食进行观察时发现的（Holldobler 和 Wilson, 2009）。寻找食物源的初始阶段几乎是随机的，而由那些从食物源返回来的蚂蚁留下的信息素踪迹会驱使其他蚁群加入对食物的分享当中。信息素踪迹越强，就会有越多的蚂蚁去追踪，直到通往食物源的路径较少或者消失。

与蚂蚁类似，白蚁能够使用相似的“赢家通吃”激励过程来搭建巢穴。白蚁能够在初始时随机放置信息素浸渍的土壤颗粒，但在给定位置放置另一个泥球的概率会随着察觉到其他泥球和相应信息素的存在而增加（Backers、Holland 和 Deneubourg, 1994; Dorigo、Bonabeau 和 Theraulaz, 2000）。最后，会出现泥柱，并且这些泥柱会通过激励过程进一步变化，该激励过程是由化学信息素、水蒸气和二氧化碳的多种浓度的相互作用而引起的。

黄蜂和蜜蜂使用信息素和视觉的组合方法来搭建复杂的六角形单元巢穴，它们能够识别巢穴搭建过程中的单元，并通过使用少量的内部规则来以一定的方式扩大现有的“工地”。比如，Theraulaz 等人发现，对于蜂群中的巢穴搭建，在一个三壁场地上增加一个单元的概率比在两壁场地上的情况高十倍（Theraulaz 和 Bonabeau, 1999）。当一只昆虫离开后，另一只昆虫就能够回到它所在的位置，并使用具有稍微不同局部环境的相同内部算法进行另一种调整。经过成百上千的黄蜂或蜜蜂的集体合作，最终实现了一个完整的巢穴结构。

激励过程绝不仅限于群居昆虫，在人类世界中同样也存在激励的例子。Holland 和 Melhuish 描述了一个这样的例子，该例子中有几个司机尝试通过协商来通过一条泥泞的小路。如果一辆汽车发现小路上某些区域的

淤泥太深，这一较深的线索标记将作为使其他认真的司机避开这一区域的信号（Holland 和 Melhuish, 1999）。另一个精选的例子则是像 Wikipedia 和 YouTube 一样的社交网络，在这里消费者的帖子改变了媒体的“环境利益”，这些媒体反过来又会吸引其他使用者的注意（Parunak, 2006a）。当前，科学家和工程师继续设计和开发模仿自然界中所观察到的成功激励系统的工程系统。通过关注相对相同机体类的集体行为，他们希望去除高度专门化（昂贵）的机体所进行过程的需要，并增加了更多关键任务应用中防止系统故障的稳健性。

2 人工激励的相关工作

最近几年，激励框架已经被广泛应用——从移动通信数据路由（Roth 和 Wicker, 2003）、对等网络（Mamei 和 Zambonelli, 2005）到数据挖掘（Ramos 和 Abraham, 2004），甚至是军事机器人群的开发（White, 2005）等。在白蚁和蚂蚁中观察到信息素扩散物理学后，人们通常仿照这些系统的动力学，而这些系统中的机体能够在它们的局部环境中放置不同种类的“虚拟信息素”，该信息素可以是物理的、模拟的，甚至可以是网络结构（White 和 Salehi-Abari, 2008），在这里，信息素浓度能够被分配为节点或边。就像实际信息素一样，这些虚拟模仿物能够被程序控制以随时间衰减；而机体本身也能够被程序控制来以变化的速率放置这些信息素，并根据应用的本质或期望的机体间相互作用来增加或减小它们的灵敏度（Parunak, 2006b）。

人们已经创建了蚁群算法的全部门类，以此来使用模拟信息素和类蚁群机体解决比如车辆路径、网络路由和图着色等分布式优化和控制问题。蚁群算法尤其适用于解决旅行商问题（TSP），其中一个机体必须找到最短的封闭路线，同时需要触及网络中的每一个城市或节点。蚂蚁系统（AS）、蚁群优化（ACO）（Dorigo, Bonabeau 和 Theraulaz, 2000）和基于蚂蚁的控制（ABC）（White, 2005）只是人们创建的诸多种类蚁群算法中的一些，这些算法被用来解决 TSP 问题。其中虚拟蚂蚁一旦完成一个封闭路径后，就会离开位于它们所越过的边上的一个人工信息素踪迹，这些信息素增加了其他蚂蚁跟随踪迹并找到目标的可能性。应用信息素蒸发来减小初始踪迹的影响（当没有现成的信息素影响决策时），而且它能够使系统忘记那些被证明是不再有效的踪迹。在一种应用中，ABC 方法在电话网络中被用于呼叫路由，“老的”虚拟机体甚至被程序控制来舍弃那些使它们到达目的地花费较长时间的少量信息素（White, 2005）。组的大小和信息素分散

同样必须由程序仔细控制来避免沿路径上放置压倒性数量的信息素。在 TSP 系统中使用这些算法，通常会比使用像进化计算或者模拟退火之类的通用算法寻找到更多的优化路径。

其他的激励框架，比如 Ulieru 等人的功能激励医疗诊断系统（SMDS）（Ulieru 和 Unland, 2006）可应用于那些与 TSP 不属于同一类的问题。设计 SMDS 是为了通过集体智慧获得更加精确的医疗诊断，而不是依赖一个机体（或医生）的有限的或带有偏见的看法。首先，将一个诊断要求置于虚拟的黑板环境中，环境中的不同虚拟“诊断机体”（专门为某些类型的疾病设计）会根据该诊断来要求是否决定在它们的专长领域内决定尝试将这些问题分类，如果一个机体得出一个积极的结论，它的决定将被用类似树的格式登记在黑板上。其他在该诊断类内更具专长的机体会到来，并能够检查已经存在的树且判断是否需要添加诊断分类（如果它们自身的信息素类型与一个给定树枝上的信息素类型足够相似）。最后完成的诊断树可用于更加正确的医疗保健。

在物理领域中，群机器人曾经是激励框架的主要试验台，因为间接通信有助于改善干扰的问题。有了群机器人，许多具有优先处理能力的小的机体就能够相互配合来实现有益的集体行为。而人们已经进行了许多尝试来在这些系统中使用实际的信息素（Wagner、Lindenbaum 和 Bruckstein, 1999），更多的研究包括在一个物理介质比如无线电频率识别（RFID）卡片或标签中使用虚拟信息素分布。机器人能够向这些物体读出和写入信息，而且它们创建的信息此后能够被其他机器人或人类读取或改变（Mamei、Quaglieri 和 Zambonelli, 2006；Mamei 和 Zambonelli, 2007）。绝大多数机器人研究集中于使用卡片作为一种在环境中定位物体（Kim 和 Chong, 2007；Mamei、Quaglieri 和 Zambonelli, 2006；Mamei 和 Zambonelli, 2005；Mamei 和 Zambonelli, 2007；Milella、Cicirelli 和 Distante, 2008；Patil 等, 2008）、追踪机器人本身位置和姿态（Bekkali、Sanson 和 Matsumoto 2007；Chen 等, 2007；Howard、Parker 和 Sukhatme, 2006；Lee 和 Lee, 2006；Roussos 等, 2007）或者使用 SLAM（同步定位于地图）技术的一些组合（Kleiner 和 Dornhege, 2007；Kleiner、Prediger 和 Nebel, 2006）方法，其中机器人使用无源 RFID 标签来建立多变环境的“地图”并用其来定位自己或者寻找人类受害者（Carbone、Finzi 和 Orlandini, 2008）。在其他的地图绘制应用中，虚拟信息素在一个增加性能的努力中被用来避免单个机器人的轨迹重叠（Mamei 和 Zambonelli, 2007）。这一工作中的绝大多数集中于通过像卡尔曼滤波的统计技术（Bekkali、Sanson 和 Matsumoto, 2007）、

模糊推理技术 (Milela、Cicirelli 和 Distant, 2008), 甚至是通过使用多方向 RFID 天线 (Kim 和 Chong, 2007) 来减小定位误差。

其他集体机器人学的应用, 比如建筑业, 对信息素操纵的强调减少, 但仍然使用了白蚁筑巢和蜂箱建造中观察到的空间排序和聚类 (Holland 和 Melhuish, 1999)。人们设计了一种物理筑巢的实验, 其中机器人由程序控制来抓紧薄的圆形“游标”并将它们投入群中 (Backers、Holland 和 Deneubourg, 1994)。在该例子中, 机器人本质上相互无视对方, 只集中于对局部游标的操纵。这种建设环境中的配合可通过赋予建筑材料跟操纵它们的机器人“回话”的能力而变得更加复杂 (Werfel 和 Nagpal, 2006), 这在必须将系统导向特定结构布局的情况中可能是有用的。对于这样一种情况, 该情况中某些种类的结构比其他结构更令人期待, Bonabeau 等人的研究试图使用遗传算法来理解哪一个机体指令会产生“更好的”结构 (基于事先定义的适应度) 和这些指令有什么共同点 (Bonabeau 等, 2000)。

就像已经建立的那样, 基于信息素的激励框架的主要优点是它具有稳健性。如果一个机体失败了, 环境中仍然会留下它们的“踪迹”或者局部信息, 而不会立即消失 (White, 2005), 从而留给系统适应的时间。此外, 不管环境如何大幅地或动态地变化, 由于机体只是局部相互作用, 所以不会不堪重负 (Parunak, 2006a)。没有一个机体会必需一个全局的图片, 因为它们能够通过非常有效的平行工作来产生集体行为 (Ramos 和 Merelo, 2004)。

就像上面提到的, 自然界中基于信息素激励的稳健性鼓励许多研究者 在人造系统中去设计类似的框架。然而不幸的是, 这些研究者中的绝大多数成为“只见树木, 不见森林”的仿生学研究中的牺牲品。人工模拟信息素分散物理学的努力曾经引起新的问题需要解决, 比如误差最小化 (Herianto、Sakakibara 和 Kurabayashi, 2007; Parunak, 2006b) 和“自动催化雪球效应”的管理 (Dorigo、Bonabeau 和 Theraulaz, 2000), 这其中由于失控的反馈过程, 虚拟信息素对于呈现合适的行为或结构而言, 太快地聚集和扩散了。信息素激励的真实自然的人工类似物的成本在于设计中维持的稳健性, 而如果科学界后退一步, 并使用自然界而不是蓝图作为导引, 那将开启更具创意的激励框架的大门。所以, 研究者可能会通过减少对激励在自然界中存在的关注, 并更多地关注激励“所能够实现的”, 来得到更好的服务。

激励“所能够实现的”, 意思是开发受自然启发的激励框架, 而不是现在存在于自然界中的。一种尝试是没有复制约束时获取与自然激励相关的益处。自然激励是在自然世界的环境中而不是人工创建系统的世界中进

化而来的。所以，合理的结论是，对于一个给定的人造系统，激励的最具稳健性和有效性的形式可能只是在概念上与它们的对应物相似。

3 所提出的框架

本章中我们提出了一种可能的人造方案，它组合了自然激励单元和用于遗传进化的信息结构。这一被称为“遗传激励”的杂交框架的目标是以一个完全可移植且基于基因的方式提供人机界面行为，该方式能使它们摆脱单个机体的特性。这种框架允许一定程度的集体适应性，而这种适应性在自然激励、人工或者别的方法中是不可能的，所以它的潜力值得人们去探讨。

我们这样定义遗传激励，它是一种间接的通信框架，在该通信框架中将集体行为算法表示为虚拟“基因”的集合，而且该算法能够通过一种外部介质部分地或全部被机体分享（见图2）。算法离散化为空间可分配基因提供了一种统一的“货币”，机体可利用这种“货币”迅速进行行为交换，这些交换的行为对其他机体来说具有局部适应性。这种“热交换”不需要对环境的先验知识就可以实现集体行为的实时优化。遗传激励与信息素激励的不同之处在于信息交换并不限于化学物理范式和其拟态相关的问题。此外，遗传信息交换不只是一个简单的踪迹或标记，它比它们更复杂，而且使其自身很容易进行进化操纵。

机体可以将其基因写入外部介质（遗传），并有可能以较小的概率进行少量的改动加入到基因中（允许变异）。当另一个机体从介质中获得基因后，它将以另一个概率接受该基因并将其作为其自身的编码（允许选择），接受基因的概率取决于先前基因的“开放性”以及写入介质中的新基因的质量。通过对遗传、变异和选择的人工模拟，就有可能经过像遗传算法或者进化编程之类的技术，使得遗传激励框架中包含进化过程。

框架也可以以这样的方式执行，即对可进化的机体行为不施加任何限制。在这种开放式系统中，希望群体内“自私的”个体行为在传播时是有益的，但可能会出现与集体利益的不一致，这样就减弱了群体的集体性能。这些不合作的表现型可通过特定的编程协议从群中去除，或者通过进化手段来绝对地抑制不合作表现型的传播。也可以应用外部的阈限来限制机体在什么时候可以访问本地存储信息，或限制机体何时能够使用访问的信息来修改其自身的算法。

遗传激励与其他形式人工激励偏离较远之处，在于它将自然界中的“激励是什么”转向了“激励能够干什么”。当前关于人工激励的绝大多数

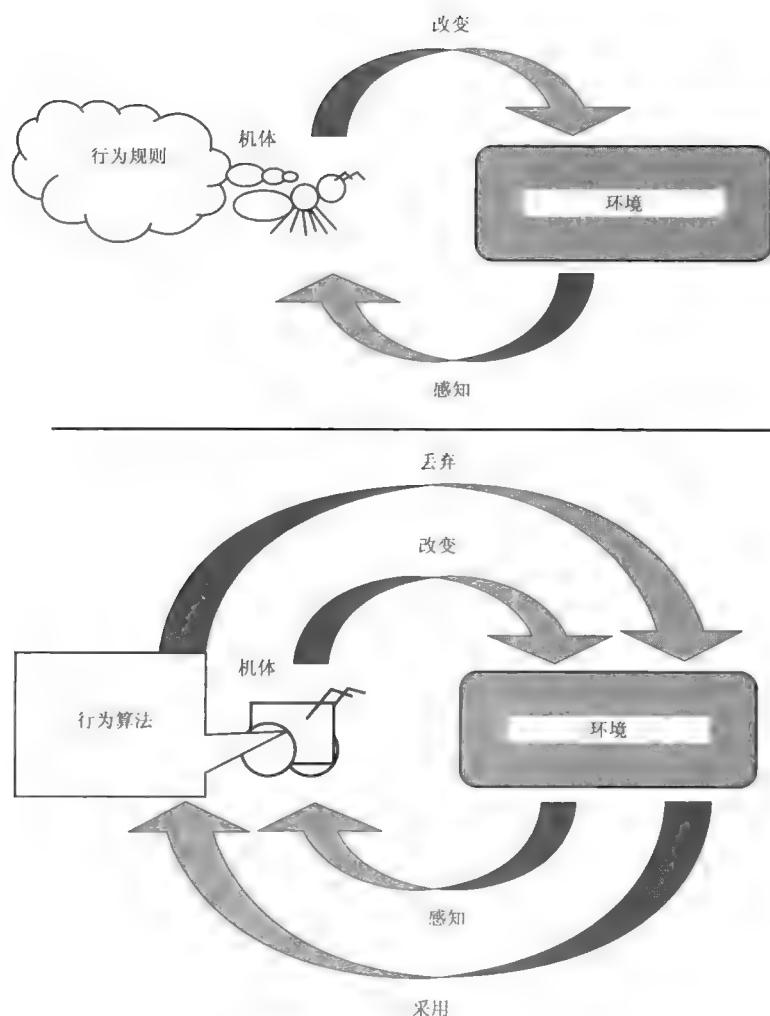


图2 传统激励（上图）和遗传激励（下图）示意

研究集中于模仿信息素通信的机制 (Dorigo、Bonabeau 和 Theraulaz, 2000; Herianto、Sakakibara 和 Kurabayashi, 2007; Parunak, 2006b; Wagner、Lindenbaum 和 Bruckstein, 1999)。而基于信息素的人工激励在经历数百万年进化的自然过程后具有其建模的好处, 但研究人员经常会陷入模仿信息素放置和扩散的物理学尝试中, 有时甚至给系统增加了不必要的复杂性。此外, 遗传激励允许机体状态保持更强的持久性, 这样进一步增加了系统的稳健性。如果单个机体学习了求解某一问题的复杂方法, 它就可以将其存入其整个行为算法中 (或者是这种方法的一种表示), 以方便其他机体使用。

4 实验

这里我们给出初步的实验结果来探讨遗传激励在群机器人应用中的效果。实验中我们采用的场景是由群机器人完成集体任务，这些机器人通过分布于环境中的射频识别卡（RFID）间接地进行相互之间的通信。

4.1 实验场景

新近开发的经济型、大容量 RFID 卡为激励的研究开创了新的机会，应用这些识别卡，机器人机体能够动态地交换复杂的逻辑信息，比如控制它们行为规则的遗传编码。实时动态地修改机体的行为“基因”能够增加群对复杂系统的适应性，这对于像未知环境集体开发之类的任务是非常有用的。某一种行为可能对环境中的多个区域更具适应性（即在这些区域内的导航更迅速）。使用遗传激励，机器人机体没有必要进行相互之间的直接通信，也不需要复杂的算法来管理信息素扩散物理学。RFID 卡可分布于整个环境中，以方便机器人记录它们的遗传编码。

实验的目标是证明遗传激励框架比那些由基因的随机交换得到的方法更能改进群的定位性能。假设机器人携带多位点染色体，染色体上每一个位点处的基因控制一个机器人对不同类型的外部刺激做出反应。每一个位点上基因的复等位基因允许机器人对特定类型的刺激做出比早期报道的单基因实验（Brandoff 和 Sayama, 2009）更多种的响应。RFID 卡非常稠密地分布于空间中，它们能够记录基因并存入它们的频率。实验中测试了遗传激励的不同执行过程，其中使机器人频繁地采纳（“多数寻找”）和避开（“少数寻找”）了所使用的基因，或者随机分配它们的染色体。另外，我们通过在复杂程度不同的环境中执行不同的遗传激励过程，并使用“辅助窗口”控制机器人何时能够访问 RFID 卡上的遗传信息，来验证遗传激励的稳健性。

4.2 仿真平台

为了实验的需要，我们使用 Python 编程语言设计了柔性仿真平台来迅速并有效地检验群体在可变环境中的搜索行为。所产生的虚拟环境由 OPEN-ROBOTS、Abe Howell 机器人公司设计的开放源码且具有 RFID 功能的移动机器人（Howell, 2008），以及 RFID 卡和一个机器人在其内可发生相互作用的比例环境（见图 3）组成。通过在多核系统上使用基于 Python 的平台，四种不同参数设置的仿真可以以高于 3 600 × 的速率实时运行。

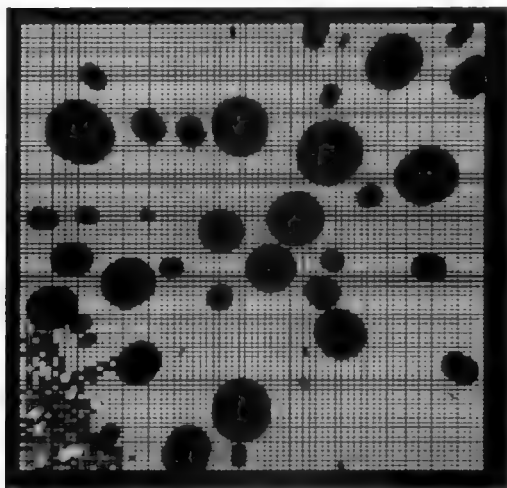


图3 十个群机器人（黄色）搜索随机产生的虚拟环境的“鸟瞰图”。环境中具有嵌入地板上的稠密 RFID 卡点阵。蓝色圆柱为障碍物，RFID 卡根据它们的当前状态改变颜色（见书后 p.9 彩图3）

机器人和障碍物由具有合适半径的圆形结构表示（机器人半径为 7.25 cm，与它们的物理对应物近似一致）。当需要虚拟视觉确认算法正常工作的时候，在仿真器中加入所提供的 VPython 包。出于审美的目的，障碍物和机器人的高度值任意给定（见图3）。如果机器人的“传感器范围”（超出其虚拟机体半径 18.5 cm）与给定障碍物或机器人的范围重叠，或者机器人越过环境的边界，机器人将记录障碍物的存在。通过测试计算机器人与 RFID 卡的碰撞来判断机器人的中心是否在给定卡的视野范围内。

4.3 实验装置

因为在地板上安装稠密且不重叠的 RFID 卡点阵的仿真环境是为了模仿室内或者工厂环境，所以通过计数与机器人群相互作用的 RFID 卡的总数量就可以确定近似作用范围。在所有的实验中，初始化一个含有 10 个机器人的群，它们在一个正方形的左下角具有随机的初始位置（同样见图3），在一个 54 m² 的环境中充满 6 840 个 RFID 卡点阵（约为 130 个 RFID 卡/m² 或者 12 个 RFID 卡/ft²①）。

每一个环境同样含有总数达 10 平方米的障碍物，但这些障碍物如何分

① 1 ft = 0.034 8 m。

配则是由一个控制参数来控制，该参数设置给定障碍物的最大可能半径。通过从零到“最大半径”参数 R 之间的均匀分布中选择一个数来确定新产生障碍物的半径。如果 R 较小，需要较多的障碍物来使其达到所分配的总障碍面积；而如果 R 较大，则需要较少的障碍物来达到这种分配。实验中使用的 R 值在 1.0~2.0 m 之间，每次增加 0.2 m。其中的一些例子如图 4 所示。

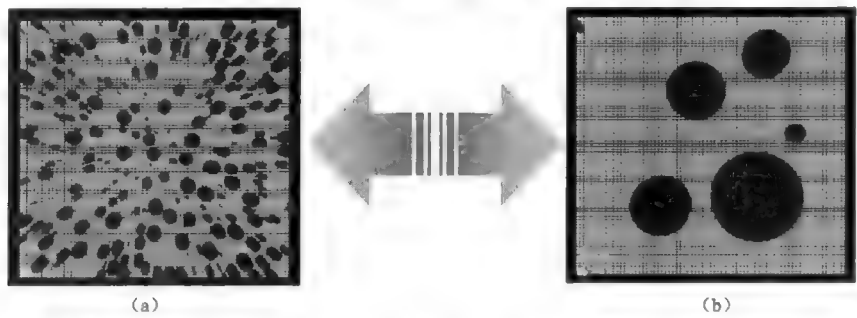


图4 R 值为 0.2 m (图 (a)) 和 2 m (图 (b)) 的环境实例。具有较小 R 值的环境中导航复杂性较大，而具有较大 R 值的环境中复杂性较小 (见书后 p. 9 彩图 4)

将所有物体都置于环境内的开放区域内，并且不与其他物体（比如障碍物）重叠。机器人的放置必须使得它们的“传感范围”相互之间不重叠。这种随机的初始化是为了避免由那些给定静态环境引起的混乱。

每一个机器人都携带一个染色体，每一个染色体上含有三个位点，每一个位点上又包含有一个基因，该基因控制机器人对环境刺激做出反应 (见表 1)。第一个位点上的基因控制机器人在检测到与另一个机器人之间具有潜在碰撞时做出反应，第二个位点上的基因控制机器人与静态障碍物或者环境边界之间存在潜在碰撞时做出反应，第三个位点上的基因控制当机器人没有检测到其周围存在任何障碍物或其他机器人时做出反应。等位基因有 128 种不同的组合方式，这使得其中的机器人比在单基因实验中具有更多的算法柔性 (Brandoff 和 Sayama, 2009)。在每一次仿真开始时，所有 10 个机器人初始化为具有染色体 (1, 1, 0)，由此产生的显形引起机器人远离其他机器人和障碍物，但同时以其他方式向前推进。这种染色体促使机器人在环境中分散分布，而不是成群地堆积在角落里。

表 1 对控制每一个机器人行为的染色体结构和控制特定情况中行为的潜在基因的分解分析。注意：机器人以离散的增量移动或选择，分别为 9.2 cm 和 92.1°
(一个物理 OPEN-ROBOT 在 1 s 内可移动或旋转的最大距离)

等位基因	位点 1 (对机器人做出反应)	位点 2 (对障碍物做出反应)	位点 3 (对开放空间做出反应)
0	转向机器人	转向障碍物	向前移动一次

续表

等位基因	位点1 (对机器人做出反应)	位点2 (对障碍物做出反应)	位点3 (对开放空间做出反应)
1	选择远离机器人	旋转远离障碍物	向后移动一次
2	后退远离机器人	后退远离障碍物	向前移动两次并向左旋转
3	从转向、旋转远离或者后退 远离机器人中随机选择	从转向、旋转远离或者 后退远离障碍物中随机选择	向前移动两次并向右旋转
4			向后移动两次并向左旋转
5			向后移动两次并向右旋转
6			在向左旋转、向右旋转或 向前移动一次中随机选择
7			在向左旋转、向右旋转或 向后移动一次中随机选择

RFID 点阵的作用类似于一个分布式计数系统，它记录机器人撞击 RFID 卡的次数和每一个机器人所携带基因的种类。机器人每进入 RFID 卡范围内一次，RFID 卡将增加其“撞击”计数器和相应于该机器人所携带的单个等位基因的计数器一次。随着时间的推移，RFID 卡将频繁地产生局部应用的等位基因的清单。机器人能否访问卡上的信息，则取决于辅助窗口，它是另一个控制参数。执行这些窗口是为了避免机器人太过迅速地采纳新的基因和由于瞬间切换行为引起的原地“抖动”。就像图 5 中所表示的，机器人只有在 RFID 卡的撞击计数器在由实验者所定义的“撞击窗口”范围内时，它才能够给予 RFID 卡的信息修改其染色体。根据实验，窗口在 1 ~ 9 之间的撞击后打开，而在 2 ~ 10 之间的撞击后关闭。图 6 描述了机器人和 RFID 卡之间的相互作用算法。当机器人只能访问一个给定窗口内的信息时，它们能够在无

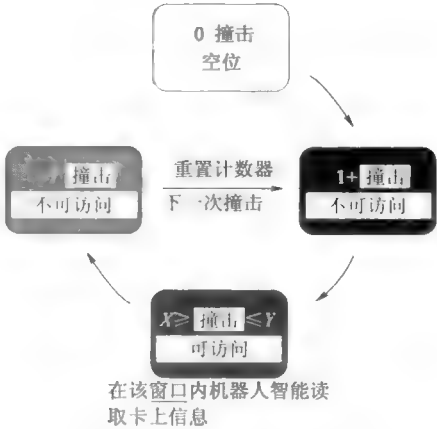


图5 由存储在卡上的“撞击计数器”控制对 RFID 卡的访问。RFID 卡根据撞击的次数，能够在几种不同的可访问和不可访问状态（和颜色）间循环

障碍窗口关闭后将 RFID 卡的全局撞击计数器“重置”为零。

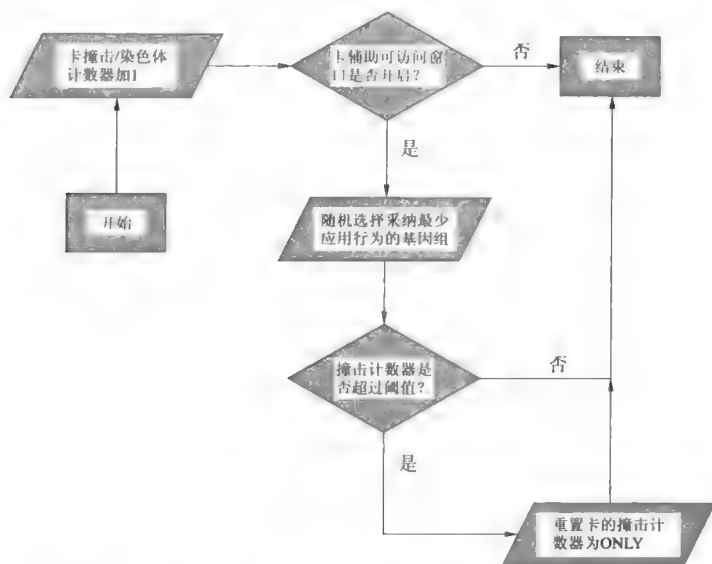


图6 描述“少数寻找”相互作用模式下单次相遇时机器人和 RFID 卡之间相互作用的流程图。其中机器人根据卡上的可用信息采纳最少应用的行为基因组。这里的可访问窗口指的是卡撞击阈值，在该阈值范围内，机器人可以访问存储在 RFID 卡上的遗传信息

为了确定遗传激励框架最有效的执行过程，实验测试了四种机器人与 RFID 相互作用模式：“少数寻找”“多数寻找”“随机选择”和“无阈值”。其中“少数寻找”和“无阈值”模式促使机器人采纳在卡上最少记录的基因，但“少数寻找”模式将对卡的访问限制于给定的可访问窗口。“多数寻找”和“随机选择”同样适用可访问窗口，但“多数寻找”促使机器人采纳卡上最多记录的基因，而“随机选择”则使机器人随机选择它们的基因（忽略卡上的信息）。对每一种实验设置进行一系列 30 次 Monte Carlo 模拟来测试每一种模式的有效性。仿真以 $3\,600\times$ 的速率实时运行，所以长达 1 h 的模拟实验实际只需 1 s 就可以完成。

4.4 结果

图 7 中总结了得到的结果，其中比较了“少数寻找”“多数寻找”“随机选择”和“无阈值”四种模式在使用固定的 5~10 卡撞击的可访问窗口时的性能，其中使用的 R 值在 1~2 m。“多数寻找”和“无阈值”模式表现低迷，而“少数寻找”和“随机选择”模式实现了最高的平均性能。表

2 表明, 除 $R=1.6$ 米例外, “少数寻找” 模式的表现最好 (尽管对于绝大多数情况而言, 它们的性能差异没有达到一个统计的显著水平)。

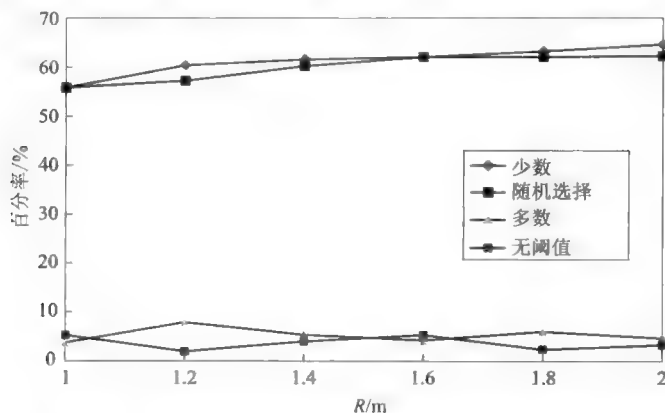


图7 具有可变障碍物尺寸的遗传激励在不同执行过程中的相对平均性能 (地板覆盖百分率 (%))。每一个值代表 30 次独立运行的平均值。除了“无阈值”允许机器人能够迅速使用 RFID 卡上的遗传信息外, 所有执行过程均使用 5~10 撞击的可访问窗口

表 2 每一个 R 值对应的卡有效范围平均百分比。每一个 R 对应的最高平均值用灰色单元格表示。表中还给出了少数寻找和随机选择条件的有效范围结果间的单边 p 值平均差试验

R/m	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
少数寻找/%	56.0	60.5	61.6	61.9	63.5	64.8
随机选择/%	55.7	57.3	60.2	62.2	62.0	62.4
单边 p 值/%	0.435	0.042 *	0.160	0.420	0.213	0.084
多数寻找/%	3.9	8.0	5.4	4.3	6.1	4.7
无阈值/%	5.3	2.1	4.1	5.5	2.4	3.5

注: * 为该行最小值。

对“少数寻找”模式的仔细检查使得能够对它如何在仿真过程中影响机器人行为增加更加深入的理解, 并使得能够将其与“随机选择”模式比较。图 8 (a)~图 8 (c) 给出了群通过增大速率在获得“新发现卡”过程中对停滞时期集体反应的试验性证据, 在该速率上, 机器人群扩大它们的行为范围, 然后当越过停滞时期后再减小该范围。例如: 在曲线 (a) 中, 卡发现停滞时期约为 $t=40$ s 直到行为改变率增加时的 $t=50$ s。最终, 新卡发现率同样增加, 并越过停滞时期。

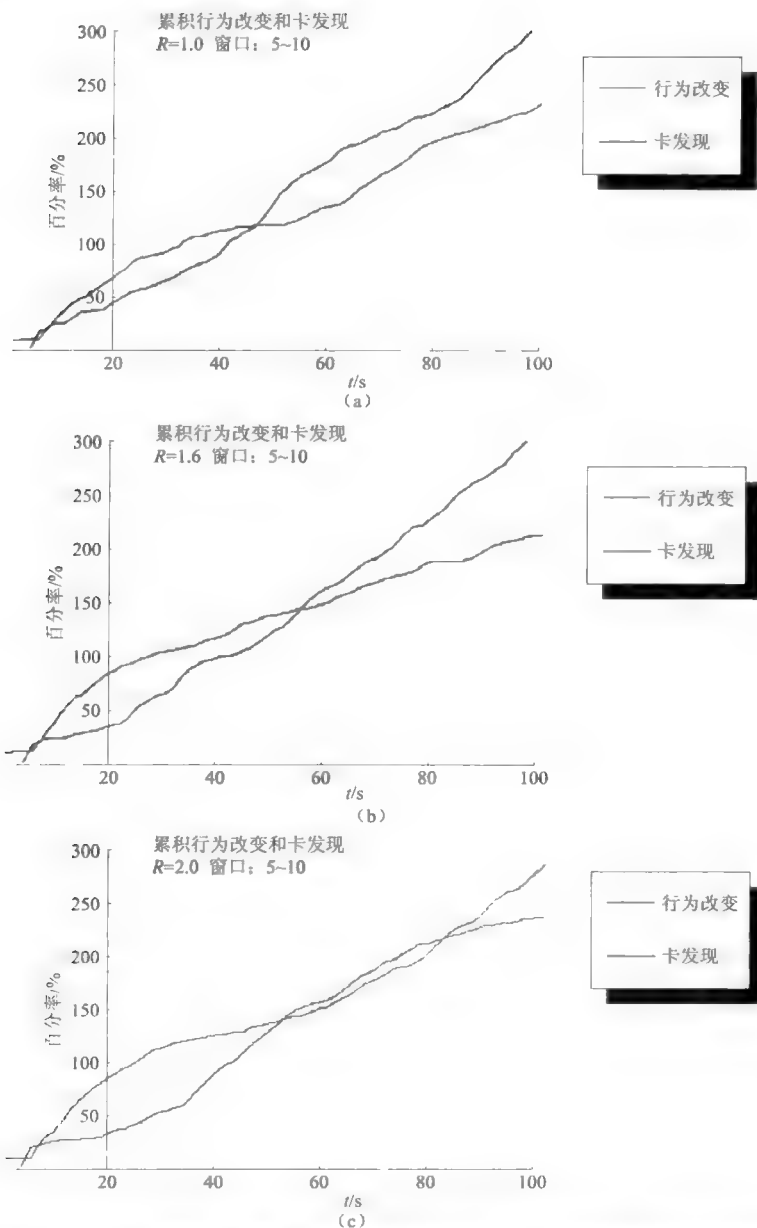


图8 在100 s内机器人行为的累积变化数和机器人发现卡的累计数的时间序列曲线。其中可访问窗口为5~10; $R=1.0$ m (见图(a)), 1.6 m (见图(b)), 1.0 m (见图(c))。在不同时间尺度上可观察到明显的累积停止时期, 在该时期内卡发现速率或行为改变速率明显减慢 (见书后 p. 10 彩图8)

图 9 ~ 图 11 给出了整个仿真过程中所有机器人对每一个位点上的基因

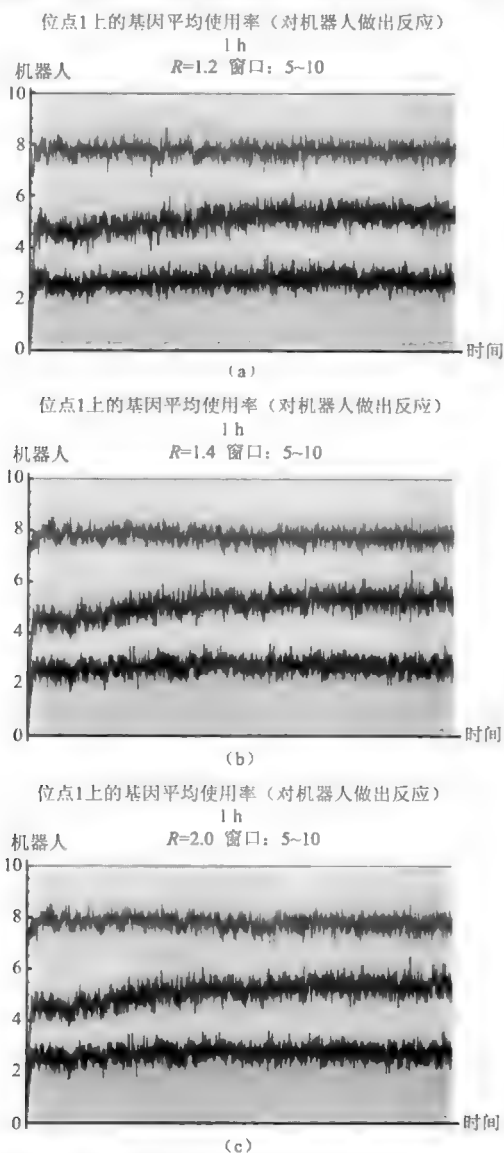


图 9 整个仿真过程中 (1 h) 位点 1 (控制机器人对其他机器人作出反应) 上所有机器人的基因平均使用率。选择 R 值分别为 1.2, 1.4 和 2.0, 且可访问窗口为 5~10。与四种不同可能的等位基因对应的颜色分别为: 红色表示“旋转向前”, 绿色表示“旋转远离”, 橘色表示“返回”, 蓝色表示“随机选择” (见书后 p.11 彩图 9)

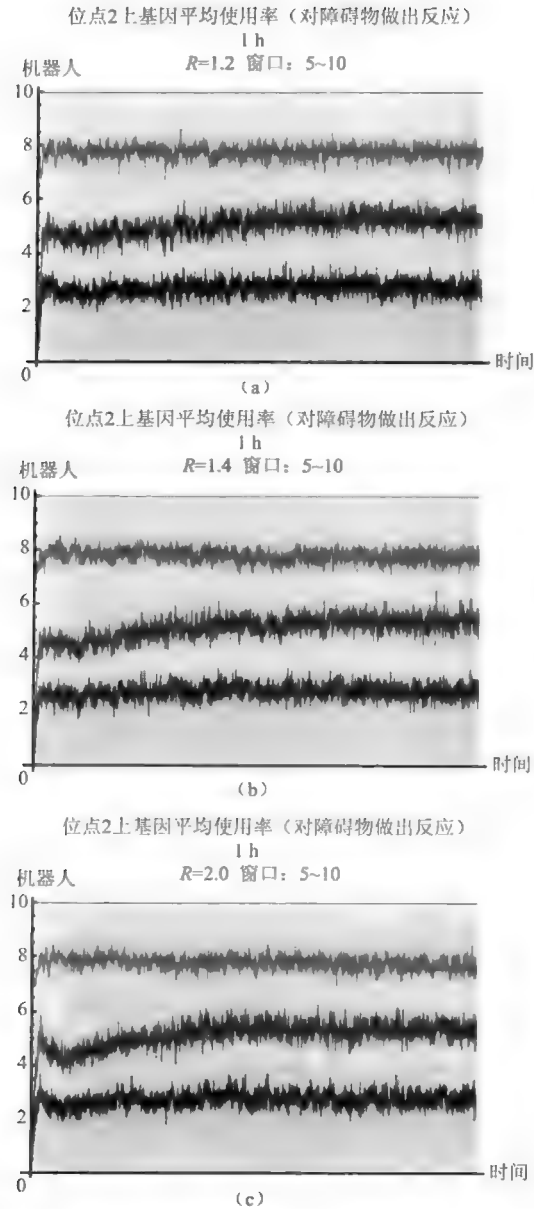


图 10 整个仿真过程中（1 h）位点 2（控制机器人对静态障碍物做出反应）上所有机器人的基因平均使用率。选择 R 值分别为 1.2, 1.4 和 2.0, 且可访问窗口为 5~10。与四种不同可能的等位基因对应的颜色分别为：红色表示“旋转向前”，绿色表示“旋转远离”，橘色表示“返回”，蓝色表示“随机选择”（见书后 p. 12 彩图 10）

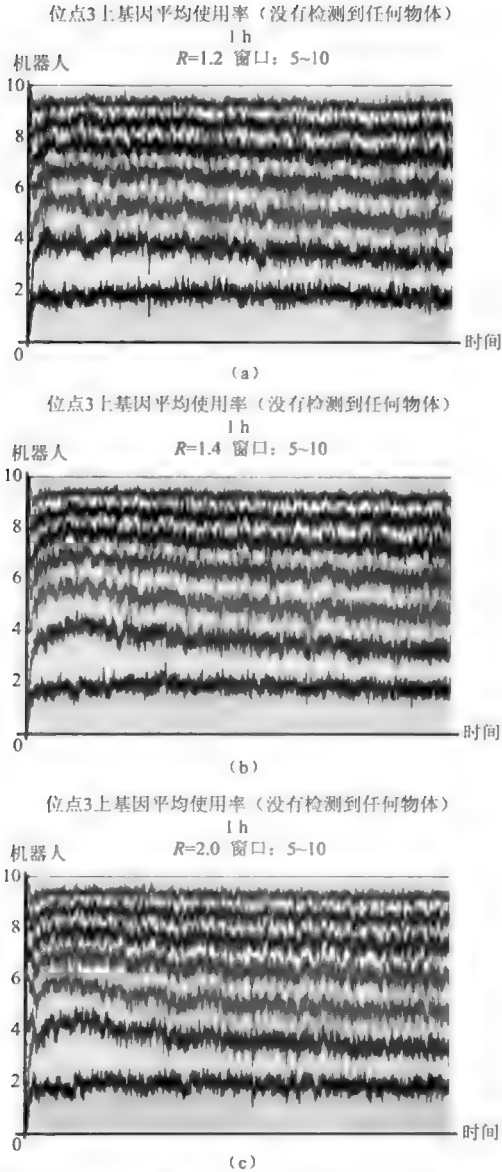


图 11 整个仿真过程中（1 h）位点 3（当没有检测到任何障碍物/机器人时控制机器人运动）上所有机器人的基因平均使用率。选择 R 值分别为 1.2，1.4 和 2.0，且可访问窗口为 5~10。与 8 种不同可能的等位基因对应的颜色分别为：红色表示“向前移动”，绿色表示“向后移动”，蓝色表示“向前移动两次并向左旋转”，青色表示“向前移动两次并向右旋转”，黄色表示“向后移动两次并向左旋转”，橘色表示“向后移动两次并向右旋转”，粉红色表示“随机旋转或向前移动”，紫色表示“随机旋转或向后移动”（从下往上看）（见书后 p. 13 彩图 11）

的平均使用率。其中是在 1 s 内进行平均的。其中使用 $R = 1.2 \text{ m}$ 和 $R = 2.0 \text{ m}$ 两个值,因为在这些值上,“少数寻找”模式超过“随机选择”模式的差额最大(分别为 3.2% 和 2.4%)。为了保持连续性,使用 $R = 1.4 \text{ m}$ 作为中间值。初始化具有染色体 (1, 1, 0) 的所有机器人(使它们选择远离其他机器人或障碍物或者向外移动)显然是改变所有位点上的初始等位基因分布。每一个位点上等位基因分布的样式作为识别标识,这有助于区分“少数寻找”模式和“随机选择”模式,其中的等位基因通常是均匀分布的,与初始条件无关。

5 讨论

在对四种模式的测试实验中,“少数寻找”模式促使形成遗传物质的局部多样性,而“多数寻找”模式则是一个“赢家通吃”的事件过程。“多数寻找”模式的平均覆盖效果不佳,而“少数寻找”模式和“随机选择”模式能够产生同样高的覆盖率。

图 8 表明“少数寻找”模式(不像“随机选择”模式一样)使得机器人能够在新卡发现过程中通过更加迅速地改变它们的基因来对停滞时期做出集体反应。而结果中描述的停滞时期是有用的,这需要进行进一步的实验来确定任何存在的因果关系。同样,由于机器人位置的改变,环境复杂性和环境布置,以及停滞时期的比例可能在时间和空间上具有很大的不同。这使得因果关系的确认更加困难。

图 9 ~ 图 11 有助于解释为什么“少数寻找”模式会胜过“随机选择”模式。在位点 1 和 2 上(见图 9 和图 10),这两个位点控制机器人对其他机器人和障碍物如何做出反应,存在一个基因使用率的初始隆起,它与“返回”行为相关。这表明在仿真的开始时间内“返回”行为在寻找新 RFID 卡过程中是有用的(防止机器人避开基因)。在一段时间后,分布逐渐平息,从而使得在任何给定时刻,群中所有基因都或多或少具有平等的代表权。在位点 3(见图 11)上,“向前移动”和“向后移动”基因初始时比其他等位基因代表得更多。随后,等位基因分布同样会平息,但“向前移动”基因在群中保持了一个相对较大的存在性。

在“随机选择”模式中,基因的杂乱无章组合,平均起来会产生一种等位基因分布,该分布使得所有基因具有平等的代表权。在“少数寻找”模式中,这种分布只出现在仿真的末尾。即使那样,分布经常也会稍微偏向有效基因(比如“向前移动”)。“少数寻找”模式使得适应性基因在等

位基因分布过程中“过度表示”的事实似乎是这种模式胜过“随机选择”模式的原因。

在证明遗传激励框架潜在有效的同时，实验设计中必须要考虑到几种潜在的缺点和混杂的错误。在实验中，机器人接受表示障碍物的传感器读数的顺序会影响它们的整体运动。仿真环境构建本身可能会存在问题。将许多 RFID 卡隐藏在障碍物下或深锁在永久不可访问区域（在高度复杂的环境中）中的事实，可能会使平均结果偏态。此外，障碍物的均匀性（这里均为圆形）和一直使用的方形环境形状并不能完全表示实际世界中的环境。

在一个更加信服地证实遗传激励潜力的努力中，必须在其他更加简单或者更加复杂的技术背景中全面检验其框架，以此来确定它在实际应用中的真实有用性。更加高级的技术可能会对更好的性能起作用，但这是以在开发个体学习过程上增加时间和精力为代价。然而，这种成本-效益折中可能会改变对环境 and 置于系统中的局部约束的依赖性。此外，有必要在一个联合的实验框架下对遗传激励进行更加稳健的测试。未来的实验应当对所有算法模式进行多种 Monte Carlo 仿真，其中包括改变 RFID 卡的密度（从非常稀少到高度稠密）和改变环境的尺寸，以及对环境进行不同的规划和放置不同形状的障碍物。只有通过相同的方式全面测试每一个参数，才能确定哪一个（哪些）参数在遗传激励的成功执行过程中最重要。同样，除了空间填充，很可能存在遗传激励在其中能够更加明显地与其他技术区分开来的工程应用。应当全面开发其他可能的应用，来确定什么是遗传激励的“杀手级应用”。

对系统的潜在改进包括对存储在 RFID 卡或“智能”RFID 卡上的遗传信息进行时间标记，其中的“智能”RFID 卡能够与其他 RFID 卡局部地交换信息，这有助于定位机器人（与 Werfel 和 Nagpal 在 2006 年的研究类似，其中的障碍物和机器人可以相互通信）。另外，根据局部需要，允许在地图的不同区域内放置多个同时存在的可访问窗口（与 Dorigo、Bonabeau 和 Theraulaz 在 2000 年的研究类似），这在而且只能在机器人能够自主确定行使中的合适阈值时才能有帮助。这方面在机器人中允许遗传进化可能是有用的。在介绍这种突变算子过程中，可以将新颖性引入系统中来帮助机器人发现更具适应性的行为或者与环境相互作用的方式。

在应用进化算子过程中可访问窗口的个性化操作可能是极大地改进遗传激励性能的最重要的因素。阈值的重要性已经由 Dorigo 和 Bonabeau 进行了全面的检验（Dorigo、Bonabeau 和 Theraulaz, 2000），他们发现简单的阈

值模型具有局限性,这是因为它们固定不变的性质,所以只有在较短的时间尺度上有效。从长远看来(可能是时间的函数),可访问窗口应当可以改变并可分化以使机体专业化。将来的工作在于确定这种阈值的可变性是否可行或实用。

6 结论

遗传激励作为另一种基于信息素的人工激励来通过自组织实现集体行为,具有极大的应用前景。与基于信息素激励不同的是,遗传激励不会由于试图模仿化学扩散而陷入不必要的困境中。初步的实验表明遗传激励是群机器人领域中的一种有效的工具,但仍需要许多理论工作来证实这种框架在机器人学和其他领域中的稳健性。另外,执行行为元规则来控制机体对局部信息的访问对于将群的应急行为导引向有用的目标具有必要性。这些相互作用约束在机体能够实时进化它们行为的系统中甚至更加重要。未来的工作和进一步的实验将专注于这些问题并开发一种将遗传激励嵌入其中的具备分散通信的可视化平台。

欲获得本章仿真中的底层代码,请联系 Joshua Brandoff, 邮箱为: josh.brandoff@gmail.com。

参考文献

- [1] Howell, A. : Abe Howell's Robotics (2008), <http://www.abotics.com>
- [2] Beckers, R. , Holland, O. E. , Deneubourg, J. L. : From local actions to global tasks: stigmergy and collective robotics. In: Artificial Life IV, pp. 181 – 189. MIT Press, Cambridge (1994)
- [3] Bekkali, A. , Sanson, H. , Matsumoto, M. : RFID indoor positioning based on probabilistic RFID map and Kalman filtering. In: WIMOB 2007: Proceedings of the Third IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, p. 21. IEEE, Washington, DC, USA (2007)
- [4] Bonabeau, E. , Silvain, G. , Snyers, D. , Kuntz, P. , Theraulaz, G. : Three-dimensional architectures grown by simple “stigmergic” agents. BioSystems 56, 13 – 32 (2000)
- [5] Brandoff, J. , Sayama, H. : Cultural transmission in robotic swarms through RFID cards. In: Proceedings of the Second IEEE Symposium on Artificial Life (IEEE- CI-ALIFE 2009), pp. 171 – 178. IEEE, Nashville (2009)
- [6] Carbone, A. , Finzi, A. , Orlandini, A. : Model-based control architecture for attentive robots in rescue scenarios. Autonomous Robots 24 (1), 87 – 120 (2008)

- [7] Chen, P. Y., Chen, W. T., Wu, C. H., Tseng, Y. C., Huang, C. F.: A group tour guide system with RFIDs and wireless sensor networks. In: IPSN 2007: Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, p. 561 – 562. ACM, New York (2007)
- [8] Dorigo, M., Bonabeau, E., Theraulaz, G.: Ant algorithms and stigmergy. *Future Generation Computer Systems* 16 (9), 851 – 871 (2000)
- [9] Herianto, S. T., Kurabayashi, D.: Artificial pheromone system using RFID for navigation of autonomous robots. *Journal of Bionic Engineering* 4 (4), 245 – 253 (2007)
- [10] Holland, O., Melhuish, C.: Stigmergy, self-organisation, and sorting in collective robotics. *Artificial Life* 5 (2), 173 – 202 (1999)
- [11] Holldobler, B., Wilson, E. O.: *Superorganism: The Beauty, Elegance and Strangeness of Insect Societies*. W. W. Norton & Company, Inc., New York (2009)
- [12] Howard, A., Parker, L. E., Sukhatme, G. S.: Experiments with a large heterogeneous mobile robot team: exploration, mapping, deployment and detection. *International Journal of Robotics Research* 25 (5 – 6), 431 – 447 (2006)
- [13] Kim, M., Chong, N. Y.: RFID-based mobile robot guidance to a stationary target. *Mechatronics* 17 (4 – 5), 217 – 229 (2007)
- [14] Kleiner, A., Dornhege, C.: Real-time localization and elevation mapping within urban search and rescue scenarios: field reports. *Journal of Field Robotics* 24 (8 – 9), 723 – 745 (2007)
- [15] Kleiner, A., Prediger, J., Nebel, B.: RFID technology-based exploration and SLAM for search and rescue. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Beijing, China, pp. 4054 – 4059.
- [16] Lee, H. J., Lee, M. C.: Localization of mobile robot based on radio frequency identification devices. In: SICE-ICASE International Joint Conference, pp. 5934 – 5939 (2006)
- [17] Li, J., Poulton, G., James, G.: Agent-Based Distributed Energy Management. In: Orgun, M. A., Thornton, J. (eds.) *AI 2007. LNCS (LNAI)*, vol. 4830, pp. 569 – 578. Springer, Heidelberg (2007)
- [18] Mamei, M., Quaglieri, R., Zambonelli, F.: Making tuple spaces physical with RFID tags. In: SAC 2006: Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, pp. 434 – 439. ACM, New York (2006)
- [19] Mamei, M., Zambonelli, F.: Physical deployment of digital pheromones through RFID technology. In: AAMAS 2005: Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 1353 – 1354. ACM, New York (2005)
- [20] Mamei, M., Zambonelli, F.: Pervasive pheromone-based interaction with RFID tags. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* 2 (2), 4 (2007)
- [21] Milella, A., Cicirelli, G., Distante, A.: RFID-assisted mobile robot system for map-

- ping and surveillance of indoor environments. *Industrial Robot* 35 (2), 143 – 152 (2008)
- [22] Parunak, H. V. D. : A survey of environments and mechanisms for human-human stigmergy. In: *Environments for Multi-Agent Systems II*, vol. 3830, pp. 163 – 186 (2006a)
- [23] Parunak, H. V. D. : Evolving swarm agents in real time. In: *Genetic Programming Theory and Practice III*, ch. 2, pp. 15 – 32 (2006b)
- [24] Patil, A. , Munson, J. , Wood, D. , Cole, A. : Bluebot: Asset tracking via robotic location crawling. *Computer Communications* 31 (6), 1067 – 1077 (2008)
- [25] Ramos, V. , Abraham, A. : Evolving a stigmergic self-organized data-mining (2004) , <http://arxiv.org/abs/cs.AI/0403001>
- [26] Ramos, V. , Merelo, J. J. : Self-organized stigmergic document maps: environment as a mechanism for context learning (2004) , <http://arxiv.org/abs/cs.AI/0412075>
- [27] Roth, M. , Wicker, S. : Termite: ad-hoc networking with stigmergy. In: *Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2003*, vol. (5), pp. 2937 – 2941. IEEE, Los Alamitos (2003)
- [28] Roussos, G. , Papadogkonas, D. , Taylor, J. , Airantzis, D. , Levene, M. , Zoumboulakis, M. : Shared memories: a trail-based coordination server for robot teams. In: *RoboComm 2007: Proceedings of the 1st International Conference on Robot Communication and Coordination*, pp. 1 – 4. IEEE Press, Piscataway (2007)
- [29] Simon, H. A. : Rational choice and the structure of the environment. *Psychological Review* 63 (2), 129 – 138 (1956)
- [30] Theraulaz, G. , Bonabeau, E. : A brief history of stigmergy. *Artificial Life* 5 (2), 97 – 116 (1999)
- [31] Ulieru, M. , Unland, R. : A Stigmergic approach to medical diagnostics. In: *MAS * BIOMED 2006: Second International Workshop on Multi-Agent Systems for Medicine, Computational Biology and Bioinformatics*, pp. 87 – 103. AAMAS, Hakodate (2006)
- [32] Wagner, I. A. , Lindenbaum, M. , Bruckstein, A. M. : Distributed covering by ant-robots using evaporating traces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15, 918 – 933 (1999)
- [33] Werfel, J. , Nagpal, R. : Extended stigmergy in collective construction. *IEEE Intelligent Systems* 21 (2), 20 – 28 (2006)
- [34] White, T. : Expert assessment of stigmergy: a report for the Department of National Defence. Technical report A382144. Department of Computer Science. Carleton University, Ottawa, ON, Canada (2005)
- [35] White, T. , Salehi-Abari, A. : A swarm-based crossover operator for genetic programming. In: *Proceedings of the 10th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. ACM Press, New York (2008)

第五章 从蚁群到机器人和从机器人到 蚁群：机器人如何促进对动物 集体行为的研究

Simon Garnier

Simon Garnier, 生态与进化生物学系, Princeton 大学, Princeton, NJ 08544, 美国, e-mail: sgarnier@princeton.edu

摘要：在过去三十年里，人们对群机器人的开发部分依赖于动物社会组织中的生物发现。本文回顾了机器人为推动动物集体行为研究贡献的方法。文中表明，从技术、概念和教育的角度看，机器人能够为该领域带来重要的进步。本文的讨论基于我在与计算机科学家合作过程中的五个观察结果：机器人需要一个全面的规范；机器人是物理实体；机器人使用新的技术；机器人能够成为生物灵感的意外来源；机器人这种工具很“酷”。

1 介绍

群机器人学是一门始于 20 世纪 90 年代并在两个研究领域的交叉中发展的科学学科，这两个研究领域是集体机器人学和群体智能。群机器人学从集体机器人学中获得挑战，其主要目标是设计控制算法来同时协调多个机器人的活动。在理想情况下，这种协调能够实现一种目标任务，而这种目标任务只用单独一个机器人是不能够完成的，或者至少不能在合理的时间内完成^[16, 31, 85]。群机器人学从群体智能中获得协调规则，这些规则成为设计前面提到的算法的基础。但这些规则强调本地通信、分布式控制和自组织来产生非常复杂的集体行为，或者来解决超过单个机器人认知能力的问题^[9, 53]。

从历史上看，群体智能以及由此发展而来的群机器人学诞生于人们对动物群体尤其是昆虫群落组织结构的深入研究过程中^[9, 14]。昆虫群落的范围从几只动物到数以百万计的个体，它们显示出迷人的集体行为，而且这些集体

行为结合了高效和柔性以及稳健性^[14]。从一个觅食网络中的交通管理^[20, 29, 12, 80]，到伴随有职虫间动态任务分配的高效结构的搭建^[10, 11, 62, 76, 78]，群居昆虫间有大量并且多种多样的复杂行为^[8, 14, 26]。

从20世纪80年代的早期工作，到最近的研究进展^[14, 38]，群居动物尤其是群居昆虫所使用的协调机制已经被证明是用来解决多种复杂问题的非常有价值的灵感来源^[9, 32, 33, 49]。从仿生机器人能够完成的最普通的任务（见图1）中，人们能够发现机器人^[40]或物体^[5]的聚集、集体项目排序^[58]、机器人的分散^[71]，对环境的协同探索^[18]、目标定位^[47]、物体的协同运输^[15]、地点的集体选择^[37]、无人监督的任务分配^[54]以及移动过程中的协调^[67]。今天对人工群体智能系统的绝大多数研究，如果像过去^[57, 72]那样与生物模型间的联系不太紧密，那么生物发现在该领域的产生和发展中扮演的角色将在很大程度上被承认^[9]。

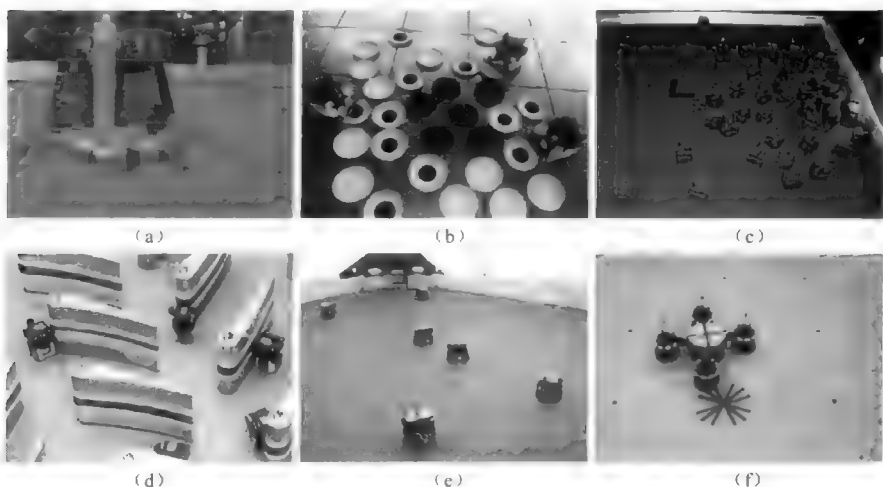


图1 机器人可实现的群体行为的例子。图(a)为物体的聚集^[5]；图(b)为物体的分类^[58]；图(c)是机器人的分散^[71]；图(d)是对环境的协同探索^[18]；图(e)是目标定位^[47]；图(f)为物体的协同运输^[15]（见书后 p. 14 彩图1）。

而反过来，机器人学对动物群落运行新发现的贡献则并不常见。作为一个生物学家，我在过去的七年里在多个实验室与计算机科学家进行过这方面的研究，当提及我的生物学研究时，绝大多数情况下他们都表现出极大的兴趣。但当与生物学家说到这些机器人学合作者时，则不会经常得到如此热烈的欢迎。这里的批评主要针对对机器人学研究的兴趣，这也是为了产生新的生物学知识。它们通常被看作是动物实验的过度简化版本，或

者是对数学模型和计算机模拟的缓慢和不方便的替代品。机器人被理解为一种超酷的工具，但不是群居动物集体行为研究中的有用工具。

本文中，我将讨论几点机器人技术对生物学中社会组织研究兴趣的论据。这些论据基于对机器人学和动物集体行为文献的简要回顾，以及我自己在这两个领域间研究中的经历。我的讨论集中于五个特定点上，它们能够为生物学家对动物社会的研究中提供新的工具和新的认识。第一，需要对机器人学进行全面的说明，在动物中，它们的行为强烈依赖于它们的感和处理信息的方式。第二，机器人是物理实体，它们能够与真实世界以及动物进行交互。第三，使用最新技术的机器人能够改进对行为数据的收集。第四，机器人能够成为生物学问题的来源，因为在它们的约束和目标实现中采用了仿生算法。第五，机器人确实是吸引人们注意的超酷工具。

2 为何机器人学对社会行为的研究有用？

2.1 机器人学需要一个全面的说明

对大型动物群体集体行为的研究对于计算机模拟和数学建模具有极大的作用^[14]。例如：Amé 等人^[1]使用一种平均场建模方法研究德国小蠊蟑螂的集体决策和最优选择。Couzin 和 Franks^[20]使用个人计算机模拟研究了行军蚁 *Blattella germanica* 中的交通组织。最近，GPU 计算的发展将复杂生物系统的模拟推向另一个高度^[21]，并且具有模拟数以百万计的交互虚拟动物的可能性，比如在 Guttal 等人的研究中。

这些方法对于理解单个动物活动和群体中总体行为间存在的联系非常有用，它们大多依赖动物个体行为的概率描述，因此它们是对动物特性和它们生存环境的一个简化描述。除了在性能和这些简化中引入的数学可追踪性方面的明显益处外，它们对于将在一种特定物种中发现的协调原则推广到其他物种中同样是有用的。

然而，人们发现这种简化描述能够避开物种间的差异，这些差异也是在它们进化和与环境相互作用中的特定产物。阿根廷蚁 *Linepithema humile* 和切叶蚁 *Atta colombica* 都使用信息素来建立它们巢穴和食物源间的踪迹，但在切叶蚁保留几个通往食物源的持久踪迹的同时，阿根廷蚁则更倾向于建立临时踪迹，这与它们的伺机觅食行为相适应^[48]。这两种物种的一般行为是相同的（铺设并寻找踪迹），但在信息素的成分、追寻踪迹的精度^[25]或者环境中食物源的分布^[23]稍有变化时，都足以产生显著的差异。类似

地,已经在鸟群模型中发现,对临近鸟群考虑方式的改变能够对鸟群的稳定性产生较大的冲击。在这方面采用拓扑关系被证明比使用集合关系更加有效^[4]。这样,比如通过将一个动物简化为一个点,并使用感知设备在其周围转一圈,我们用某种方式撇开了动物行为不是简单的有限状态机的产物,而是感知、认识和动作活动的一个更加复杂的结果^[59, 26]。

今天的生物学强调一体化的自然观^[13, 51],现在人们观察细胞、器官或生物体都是与其更高或者更低一层组织相联系地进行。细胞组成组织,组织组成器官,器官又组成生物体,等等。影响这些组织层次中一个的每一个事件,都能够与其他层建立潜在的联系,相同的一体化观点也能够应用于动物行为的研究中。在该一体化观点中,机器人学能够起到重要的作用。由于机器人必须进行完全指定的工作,所以它迫使生物学家去考虑与动物的个体技能相关联的社会行为。在一些研究中,已经使用机器人来研究动物的个体行为与其感知、认识和运动能力间的关联了(见文献[82, 83, 84]中的概括)。例如:Ayers和Witting^[2]设计了一种美国螯龙虾的机器人模型,它包含了动物的生物力学和神经学等方面。另一个例子是,Psikharpax项目组^[60]致力于开发一种机器人鼠,其感觉运动设备和神经网络控制架构模仿了真实的鼠。这种一体化方法仍然需要进一步向社会层次扩展^[3],其中动物所感知的社会信息的确切性质仍然需要进一步理解。

2.2 机器人是物理实体

机器人并不是虚拟的,它们是物理实体,所以能够与真实环境相互作用。这一特点,任何仿真和数学模型都不会拥有,这也能够使它们和真实动物一样集成于实验中。在20世纪90年代和21世纪初,生物学家和计算机科学家的合作使得人类在操作机器人方面获得了几个开创性的工作进展。例如:Michelsen等人^[61]使用机电设备模仿众所周知的蜜蜂摇摆舞,他们研究了这种舞蹈的关键部件,而且这种舞蹈对于蜂群与食物源位置的通信至关重要。Böhlen^[7]和Fernandez-Juricic使用类似的方法来研究鸟群中的社会交往,Reaney等人^[68]也使用了类似的方法研究米氏招潮蟹中雌性群体在选择雄性群体中采用的求爱信号。

最近,反应机器人的使用为社会行为的研究开辟了新的视角。这些新的器件能够根据与它们相互作用的动物的行为来调整自身的行为,改变机器人中相互作用的规则并观察动物行为中发生的变化,是系统探索所研究物种社交指令的有趣解决方法。再者,这些器件被证明能够控制动物群体的行为(见图2),它们能够作为反应剂(就像牧羊犬一样)^[79]或者进行合

适的伪装，成为假冒的同种吸引群中动物的跟随者^[46]。

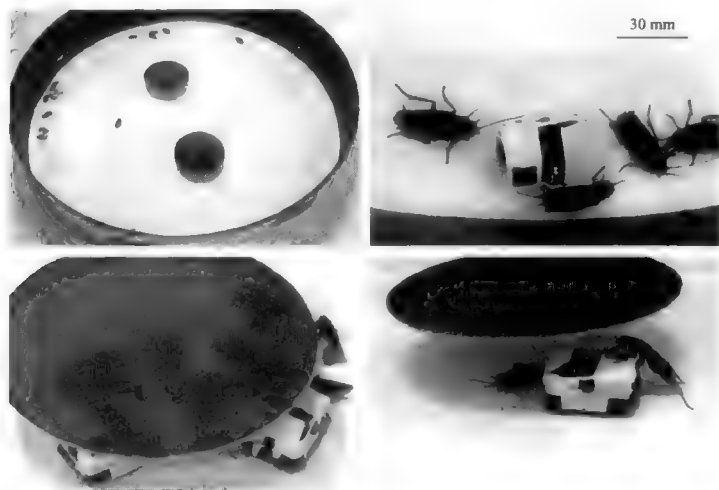


图2 动物（这里使用美洲大蠊蟑螂）与机器人（这里使用 Inshots）混合实验的例子。引自文献 [46]（见书后 p. 14 彩图 2）

在动物实验中使用机器人，是迄今机器人对社会行为研究做出的最被公认且最直接的贡献。在某种程度上，它们是 Tinbergen 在 20 世纪 50 年代早期所使用的诱饵^[77]的现代且复杂的版本。可能正是由于这种历史联系，使用机器人作为高级诱饵在行为生物学团体中被广泛接受，而纯粹的机器人实验的生物相关性则通常未能被信服。

2.3 在机器人中使用最新技术

在研究动物行为时，收集并处理数据，继而根据这些数据建立模型是一项长期且持久的工作。当涉及一次研究多个个体的行为并分辨它们之间的相互作用时，工作量似乎更大。但就像 Balch 等人^[3]所指出的，计算机科学家能够在这些任务中提供帮助。特别地，他们在处理技术进步时似乎必须使得收集动物集体行为研究所需要的大量数据变得容易。

在它们当中，计算机视觉算法带动了多种软件的开发，而这些软件使得记录行为中的多种任务实现自动化。两个特别费时的任务是动物跟踪和行为标签，现在已经存在几种解决方法来跟踪个体的移动或者识别其行为^[81, 64, 65]。但集体机器人的开发将它们带入新的水平，它们现在具备同时跟踪几十个动物并自动标识它们之间所有并发相互作用的能力^[19, 3]。（见图 3）。即使在某些条件下精确的跟踪不太可能（比如在大鱼群或者稠密的蚁群

踪迹中)，在机器人中使用光流技术来估测距离^[36, 44, 28, 70]，也为精确估测群中动物的全局位移提供了一种方法（没有数据报道）。

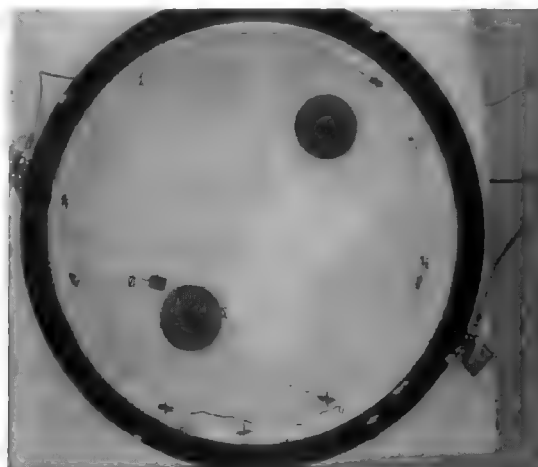


图3 Swistrack^[19]得到的多功能跟踪软件的例子。它能够跟踪实验中的动物和机器人。来自 <http://disal.epfl.ch/research/current/leurre/movies/collective-decision.avi>（见书后 p. 15 彩图 3）

用于收集动物行为数据的器件的另一个例子源自在机器人中引入射频识别（RFID）标签，这些标签能够使多机器人协调系统得以开发。在系统中，这些标签用来探测和存储机器人流量数据，就像蚁群在野外铺设并追踪信息素踪迹那样^[56, 55]。这一项技术现在正在动物集体行为的研究中逐渐表现出其潜力。将 RFID 标签贴在昆虫的背面，从而使生物学家能够精确探测个体何时进入或离开实验环境。这一技术现在已经被成功应用于蚁群^[69]、大黄蜂^[66]和胡蜂^[73]社交行为的研究中。

生物学家已经掌握了详细观察和描述自然的艺术，但他们通常缺乏那些能够简化他们工作的最新技术进步的信息。幸亏有具备高技术能力的计算机科学家有可能来弥补这一缺陷，并且为动物中社交行为问题的解答提供最新的工具。

2.4 机器人能够成为生物问题的思想源泉

自然系统对于计算机科学家来说是丰富的灵感源，动物社会也不例外。已经存在有大量的模仿动物集体行为的人工系统实例^[32, 9, 33]，在它们当中，蚁群优化算法^[27]、粒子群优化算法^[50]和蜂群算法^[49]最为著名。无

论这些情况中的哪一种，工程师都会首先寻找他们所要解决的问题与生物系统计算特性间的等价关系，然后采用这些生物特性起源机制来约束他们所从事的人工系统。在该适应性阶段中，他们在原始机制中引入变体，那些原始机制在他们看来是生物学家的意外问题。

这些意外问题的一个例子可以在蚁群优化（ACO）框架中找到。该优化系统用于解决旅行商问题或者通信网络中的路由信息问题，其灵感来源于在蚁群中发现的路径选择机制。虚拟蚁群移动穿过一个有节点相互连接的网络，并在两个或者更多的节点间寻找一条路径。一只蚂蚁每一次寻找其中的一条可能路径，并在其路径上铺设信息素，这些信息素随时间变淡，而且其强度与连接节点所需的时间成反比。当一个蚂蚁在网络内穿行并到达一个节点时，它将根据两个参数来选择网络中的下一段来追踪，这两个参数是每一段路径上信息素的数量和一个表示每一段路径内在可取性的启发权重，路径上的值越高，蚂蚁就越可能选择该路径。在信息素量驱使群落通过扩增过程做出机体选择的同时，在算法中引入启发权重来减小群落选择一种回路的可能性。这一附加条件极大地改进了蚁群算法在选择网络中两个或者多个节点间最短路径过程中的效率^[27]。

生物学中的这一实际考虑产生了一个非常有趣的问题：实际蚁群在它们输运网络中移动时，是否会使用这种启发式部件的一种等价物，即它们的地下巢穴或者它们的觅食路径？我们在最近的工作中使用阿根廷蚁研究了这一问题^[39, 42]。我们观察蚂蚁在穿过画廊网络中对称和反对称分岔中所表现出的个体行为。在没有定向线索时，穿过对称分岔的蚂蚁选择到达分岔的每一条分支的机会是均等的。而另一个方面，到达反对称分岔的蚂蚁中有 2/3 选择了那些与它们当前前进方向偏离最小的分支。我们用计算机模拟了后一种偏离的结果以研究蚁群的这种基于信息素的对路径的集体选择能力，我们模拟了在觅食路径网络中的蚂蚁群落，其中的分岔仿照了在自然路径网络中发现的分岔（寻找食物的旅途，多数为对称型；寻找巢穴的旅途，多数为反对称）。仿真结果表明，当蚂蚁在反对称分岔中选择偏离时，群落的觅食效率只在 15 min 后就加快了 3 倍（见图 4）。这一结果可用偏离的蚂蚁选择网络中回路具有最小可能性来解释，就像 ACO 框架所预测的那样。

这个例子并不是来自严格意义上的机器人领域，但它很完美地阐明了当前对集体机器人涉及的人工多机体系统的研究如何反过来影响了生物学。应当鼓励生物学家更多地关注这一领域，在这里能够出现与集体动物行为的特性相关的意想不到的问题。

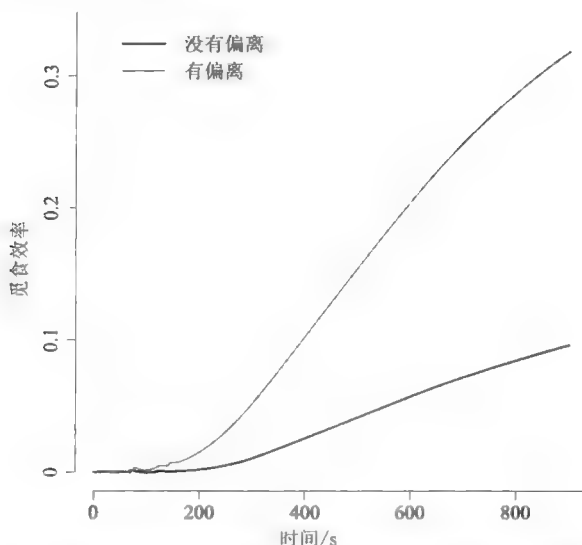


图4 蚁群在信息素踪迹网络中觅食的仿真结果。网络中的分岔结构,在寻找食物旅途中绝大多数是对称的,而在寻找巢穴旅途中是反对称的。当蚂蚁对一个分岔的选择由于分岔结构而偏离时,总体觅食效率比没有行为偏离时加快3倍。该效率增加可由在网络中选择回路的可能性最低来解释。该结果类似于在ACO算法中引入启发值后得到的结果。引自文献[39]

2.5 机器人是“超酷”的工具

普及科学发现和概念是科学家的日常工作,比如,传播科学信息可以通过在大学里做报告的形式、文章的形式供普通大众阅览,在电台或电视节目中展示,或者在科学展览或博物馆中示范。后者是我最喜欢的,因为它使科学家能够与观众进行直接的交流。但对于从事动物研究工作的科学家来说,这一类时间能够迅速转变为恶魔。使用动物中所固有的相关伦理道德和实际问题通常会限制海报或视频的展示;再者,动物不像机器那样按照指令执行任务,从而导致这种展示限于一天一次或者两次。

相反,机器人不会受到道德限制,如果它们的电池电量充足,它们能够在一天中的任何时间工作。此外,它们与动物分享在人类观察者中触发换位思考的能力,就像由越来越发达的所谓“宠物机器人”所证明的那样。所以当动物本身不能被使用时,它们是解释动物行为中概念的理想平台。

有了这一目的，我与同事设计了一个实验平台，它能够使用机器人展示蚁群选择路径寻找食物源过程中的机制^[41]。这些昆虫在它们经过的路途上或者从食物源那里铺设并追寻信息素踪迹^[48]。起初，沿路径行进的蚂蚁通过成功放置信息素形成并扩增几条路径，每一条路径上扩增过程间的竞争通常会引引起群落选择其中的一条——通常是最短的那条^[14]。这一选择机制很难向观众展示，主要是因为蚂蚁信息素我们是看不到的。在我们的机器人平台中，我们用一种可见的替代物代替这种化学信号，模仿中的每一个信息素滴由投射到地面上的一个蓝色光点表示（见图5）。这些光点能够像信息素滴那样累积或消失，并最终形成一个踪迹。我们的机器人装备有两个模仿蚂蚁触角的光学传感器，它们可以简单地通过将传感器转向能接受更多的光照来追踪轨迹。有了这一装置，我们能够重复文献中几种经典的和最新的结果（数据没有报道）。比如在两条可用路径中选择最短路径^[22]，当主路过于拥挤时将一部分流量导向另一个路径的能力^[29, 30]；或者网络分岔结构对觅食效率的作用^[39]。更加重要的是，我们同样能够向访问实验室的政府官员、小学和高中班学生以及电视台的工作人员说明性地展示这些信息素^[52]。



图5 机器人 Alice^[17] 追寻光踪迹。引自文献 [41]（见书后 p. 15 彩图 5）

如果可以讨论使用这些机器人实验来创造新的知识兴趣（更严格地讲，我们的实验证实了先前报道的结果），这种机器人施加于人类，尤其

是儿童的诱人的力量，使得它们成为解释相关动物集体行为机制的有力工具，所以它们成为促进这一领域研究的优秀使者。

3 结论

三十年来，生物学家和计算机科学家研究了能够使个体完成那些由单独一个个体不能实现的集体任务的机制。这一问题对于生物学家尤其重要，因为它涉及动物和人类中社交的起源和功能的实现。对于计算机科学家，这些机制涉及大量的复杂问题，从优化设计到分布式控制等。在一些场合中，这些问题的创新性解决方案来自对动物社交的生物学观察。我试图在本文中展示计算机科学，尤其是机器人学为何能够反过来有利于生物学家对动物集体行为的研究。

尽管有了最新工具的开发，计算机科学家能够促进生物数据的收集（见 2.3 节）或者在与动物的互动问题中提出原始的解决方案（见 2.2 节），但是他们对动物集体行为研究的贡献，其实能够超过一个实际的和技术上的帮助。他们同样能够参与生物学中新思想和新概念的开发。机器人是一个集成的平台，因此它们的行为是它们的感知、认识和机动能力与环境相互作用的产物。所以，它们是组合了塑造集体行为的不同层次组织的诱人系统（见 2.1 节）。此外，工程师带给生物启发的解决方案的改进，能够响彻整个生物界（见 2.4 节）。最后，机器人的与它们行为总体控制相关的娱乐性和吸引力，使它们能够被应用于教育目的的仪器中。

就像过去所发生的那样，生物学家和计算机科学家非常有可能在未来再次合作，但这些合作的本质可能不同。在 20 世纪 90 年代，当一个生物学家与计算机科学家讨论集体行为时，他们的目的大多是从生物学观察中开发新的应用和算法。而在今天，这种合作在很大程度上可能致力于一个生物学问题，比如最近项目中的成功案例^[37, 46, 35, 63]。

致谢

作者感谢 Jennifer K. Peterson 和 Alexandre Campo 对本文的友好评论。Simon Garnier 现在于 Princeton 大学受到 Fyssen 基金和 Searle Scholar 基金的资助（代表 Iain Couzin 教授），本文中所引用的他的工作是在 Toulouse 大学（法国）完成的，其中部分受到欧洲社会基金信息社会计划（1998—2002）对 Leurre 项目的资助、未来新兴技术武器项目（FET-OPEN-IST-

2001-35506)、来自法国科研部的 Cognitique 计划,以及法国教育、研究和技术部的研究基金的资助。

参考文献

- [1] Amé, J. M. , Halloy, J. , Rivault, C. , Detrain, C. , Deneubourg, J. L. : Collegial decision making based on social amplification leads to optimal group formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103 (15), 5835 – 5840 (2006), doi: 10. 1073/pnas. 0507877103
- [2] Ayers, J. , Witting, J. : Biomimetic approaches to the control of underwater walking machines. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 365 (1850), 273 – 295 (2007), doi: 10. 1098/rsta. 2006. 1910
- [3] Balch, T. , Dellaert, F. , Feldman, A. , Guillory, A. , Isbell, C. , Khan, Z. , Pratt, S. , Stein, A. , Wilde, H. : How Multirobot Systems Research Will Accelerate Our Understanding of Social Animal Behavior. *Proceedings of the IEEE* 94 (7), 1445 – 1463 (2006), doi: 10. 1109/JPROC. 2006. 876969
- [4] Ballerini, M. , Cabibbo, N. , Candelier, R. , Cavagna, A. , Cisbani, E. , Giardina, I. , Lecomte, V. , Orlandi, A. , Parisi, G. , Procaccini, A. , Viale, M. , Zdravkovic, V. : Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: evidence from a field study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (4), 1232 – 1237 (2008), doi: 10. 1073/pnas. 0711437105
- [5] Beckers, R. , Holland, O. E. , Deneubourg, J. L. : From local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics, pp. 181 – 189. MIT Press, Cambridge (1994)
- [6] Beshers, S. N. , Fewell, J. H. : Models of division of labor in social insects. *Annual Review of Entomology* 46 (1), 413 – 440 (2001), doi: 10. 1146/annurev. ento. 46. 1. 413
- [7] Böhlen, M. : A robot in a cage. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. Monterey, CA (1999)
- [8] Bonabeau, E. : Self-organization in social insects. *Trends in Ecology & Evolution* 12 (5), 188 – 193 (1997), doi: 10. 1016/S0169 – 5347 (97) 01048 – 3
- [9] Bonabeau, E. , Dorigo, M. , Theraulaz, G. : *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford University Press, USA (1999)
- [10] Buhl, J. , Deneubourg, J. L. , Grimal, A. , Theraulaz, G. : Self-organized digging activity in ant colonies. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 58 (1), 9 – 17 (2005), doi: 10. 1007/s00265 – 004 – 0906 – 2
- [11] Buhl, J. , Gautrais, J. , Solé, R. V. , Kuntz, P. , Valverde, S. , Deneubourg, J. L. , Theraulaz, G. : Efficiency and robustness in ant networks of galleries. *The European*

- Physical Journal B 42 (1), 123 – 129 (2004), doi: 10.1140/epjh/e2004 – 00364 – 9
- [12] Burd, M. : Ecological consequences of traffic organisation in ant societies. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 372 (1), 124 – 131 (2006), doi: 10.1016/j.physa.2006.05.004
- [13] Cain, C. J. , Conte, D. A. , Garcia-Ojeda, M. E. , Daglio, L. G. , Johnson, L. , Lau, E. H. , Manilay, J. O. , Phillips, J. B. , Rogers, N. S. , Stolberg, N. S. , Swift, H. F. , Dawson, M. N. : INTEGRATIVE BIOLOGY: What Systems Biology Is (Not, Yet) . *Science* 320 (5879), 1013a – 1014a (2008), doi: 10.1126/science.1157405
- [14] Camazine, S. : Self-organization in biological systems. Princeton University Press, Princeton (2001)
- [15] Campo, A. , Nouyan, S. , Birattari, M. , Groß, R. , Dorigo, M. : Negotiation of Goal Direction for Cooperative Transport, pp. 191 – 202. Springer, Heidelberg (2006), doi: 10.1007/11839088_17
- [16] Cao, Y. U. , Fukunaga, A. S. , Kahng, A. B. : Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous Robots* 4 (1), 7 – 27 (1997)
- [17] Caprari, G. , Siegwart, R. : Mobile micro-robots ready to use; Alice. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3295 – 3300. IEEE, Los Alamitos (2005)
- [18] Correll, N. , Martinoli, A. : Robust Distributed Coverage using a Swarm of Miniature Robots. In: Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 379 – 384. IEEE, Los Alamitos (2007), doi: 10.1109/ROBOT.2007.363816
- [19] Correll, N. , Sempo, G. , De Meneses, Y. , Halloy, J. , Deneubourg, J. L. , Martinoli, A. : SwisTrack: A Tracking Tool for Multi-Unit Robotic and Biological Systems. In: 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2185 – 2191 (2006), doi: 10.1109/IROS.2006.282558
- [20] Couzin, I. D. , Franks, N. R. : Self-organized lane formation and optimized traffic flow in army ants. *Proceedings of The Royal Society Biological sciences* 270 (1511), 139 – 146 (2003), doi: 10.1098/rspb.2002.2210
- [21] Dematté, L. , Prandi, D. : GPU computing for systems biology. *Briefings in Bioinformatics* 11 (3), 323 – 333 (2010), doi: 10.1093/bib/bbq006 From Ants to Robots and Back 117
- [22] Deneubourg, J. L. , Goss, S. : Collective patterns and decision making. *Ethology, ecology and Evolution* 1 (4), 295 – 311 (1989)
- [23] Deneubourg, J. L. , Goss, S. , Franks, N. , Pasteels, J. M. : The blind leading the blind: Modeling chemically mediated army ant raid patterns. *Journal of Insect Behavior* 2 (5), 719 – 725 (1989), doi: 10.1007/BF01065789
- [24] Deneubourg, J. L. , Goss, S. , Pasteels, J. M. , Fresneau, D. , Lachaud, J. P. : Self-organization mechanisms in ant societies (II) : Learning in foraging and division of labor.

- Experientia Supplementum 54, 177 – 196 (1987)
- [25] Deneubourg, J. L. , Pasteels, J. M. , Verhaeghe, J. C. : Probabilistic behaviour in ants: A strategy of errors? *Journal of Theoretical Biology* 105 (2), 259 – 271 (1983), doi: 10.1016/S0022-5193(83)80007-1
 - [26] Detrain, C. , Deneubourg, J. L. : Self-organized structures in a superorganism: do ants “behave” like molecules? 3 (3), 162 – 187 (2006), doi: 10.1016/j.plrev.2006.07.001
 - [27] Dorigo, M. , Stützle, T. : *Ant Colony Optimization*. MIT Press, Cambridge (2004)
 - [28] Duchon, A. , Warren, W. , Kaelbling, L. : Ecological Robotics: Controlling Behavior with Optic Flow. In: *Proceedings of the seventeenth annual conference of the Cognitive Science Society*, p. 164. Lawrence Erlbaum, Pittsburgh (1995)
 - [29] Dussutour, A. , Fourcassié, V. , Helbing, D. , Deneubourg, J. L. : Optimal traffic organization in ants under crowded conditions. *Nature* 428 (6978), 70 – 73 (2004), doi: 10.1038/nature02344.1
 - [30] Dussutour, A. , Nicolis, S. , Deneubourg, J. L. , Fourcassié, V. : Collective decisions in ants when foraging under crowded conditions. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 61 (1), 17 – 30 (2006), doi: 10.1007/s00265-006-0233-x
 - [31] Dutta, I. , Bogobowicz, A. D. , Gu, J. J. : Collective robotics-a survey of control and communication techniques. In: *Proceedings International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, pp. 505 – 510 (2004)
 - [32] Eberhart, R. C. , Shi, Y. , Kennedy, J. : *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann, San Francisco (2001)
 - [33] Engelbrecht, A. : *Fundamentals of computational swarm intelligence*. Wiley, New York (2005)
 - [34] Fernandez-Juricic, E. , Gilak, N. , McDonald, J. C. , Pithia, P. , Valcarcel, A. : A dynamic method to study the transmission of social foraging information in flocks using robots. *Animal Behaviour* 71, 901 – 911 (2006), doi: 10.1016/j.anbehav.2005.09.008
 - [35] Floreano, D. , Mitri, S. , Magnenat, S. , Keller, L. : Evolutionary Conditions for the Emergence of Communication in Robots. *Current Biology* 17 (6), 514 – 519 (2007)
 - [36] Franceschini, N. , Pichon, J. M. , Blanes, C. , Brady, J. M. : From Insect Vision to Robot Vision [and Discussion] . *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 337 (1281), 283 – 294 (1992), doi: 10.1098/rstb.1992.0106
 - [37] Garnier, S. , Gautrais, J. , Asadpour, M. , Jost, C. , Theraulaz, G. : Self-Organized Aggregation Triggers Collective Decision Making in a Group of Cockroach-Like Robots. *Adaptive Behavior* 17 (2), 109 – 133 (2009), doi: 10.1177/1059712309103430
 - [38] Garnier, S. , Gautrais, J. , Theraulaz, G. : The biological principles of swarm intelligence. *Swarm Intelligence* 1 (1), 3 – 31 (2007), doi: 10.1007/s11721-007-0004-y
 - [39] Garnier, S. , Guérécheau, A. , Combe, M. , Fourcassié, V. , Theraulaz, G. : Path se-

- lection and foraging efficiency in Argentine ant transport networks. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 63 (8), 1167 – 1179 (2009), doi: 10.1007/s00265-009-0741-6
- [40] Garnier, S., Jost, C., Gautrais, J., Asadpour, M., Caprari, G., Jeanson, R., Grimal, A., Theraulaz, G.: The embodiment of cockroach aggregation behavior in a group of microrobots. *Artificial Life* 14 (4), 387 – 408 (2008) 118 S. Garnier
- [41] Garnier, S., Tache, F., Combe, M., Grimal, A., Theraulaz, G.: Alice in Pheromone Land: An Experimental Setup for the Study of Ant-like Robots. In: *IEEE Swarm Intelligence Symposium, SIS 2007*, pp. 37 – 44 (2007)
- [42] Gerbier, G., Garnier, S., Rieu, C., Theraulaz, G., Fourcassié, V.: Are ants sensitive to the geometry of tunnel bifurcation? *Animal Cognition* 11 (4), 637 – 642 (2008), doi: 10.1007/s10071-008-0153-4
- [43] Gordon, D. M.: The organization of work in social insect colonies. *Nature* 380 (6570), 121 – 124 (1996), doi: 10.1038/380121a0
- [44] Green, W. E., Oh, P. Y., Sevcik, K., Barrows, G.: Autonomous Landing for Indoor Flying Robots Using Optic Flow. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress*, vol. 2, pp. 1347 – 1352. ASME, Washington (2003)
- [45] Guttal, V., Couzin, I. D.: Social interactions, information use, and the evolution of collective migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1 – 6 (2010) (in press), doi: 10.1073/pnas.1006874107
- [46] Halloy, J., Sempo, G., Caprari, G., Rivault, C., Asadpour, M., Tache, F., Said, I., Durier, V., Canonge, S., Am'el, J. M., Detrain, C., Correll, N., Martinoli, A., Mondada, F., Siegwart, R., Deneubourg, J. L.: Social Integration of Robots into Groups of Cockroaches to Control Self-Organized Choices. *Science* 318 (5853), 1155 – 1158 (2007), doi: 10.1126/science.1144259
- [47] Hayes, A., Martinoli, A., Goodman, R.: Distributed odor source localization. *IEEE Sensors Journal* 2 (3), 260 – 271 (2002), doi: 10.1109/JSEN.2002.800682
- [48] Hölldobler, B., Wilson, E. O.: *The ants*. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge (1990)
- [49] Karaboga, D., Akay, B.: A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence. 31 (1 – 4), 61 – 85 (2009), doi: 10.1007/s10462-009-9127-4
- [50] Kennedy, J., Eberhart, R.: Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN 1995-International Conference on Neural Networks*, pp. 1942 – 1948. IEEE, Piscataway (1998), doi: 10.1109/ICNN.1995.488968
- [51] Kitano, H.: Systems biology: a brief overview. *Science* 295 (5560), 1662 – 1664 (2002), doi: 10.1126/science.1069492
- [52] Kneser, J.: *Collective Minds: The Intelligence of Swarms* (2009) 53. Kube, C. R., Zhang, H.: *Collective Robotics: From Social Insects to Robots*. *Adaptive Behavior* 2 (2), 189 – 218 (1993), doi: 10.1177/105971239300200204

- [53] 54. Labella, T. H. , Dorigo, M. , Deneubourg, J. L. ; Division of Labor in a Group of Robots Inspired by Ants' Foraging Behavior. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* 1 (1) , 4 - 25 (2006)
- [54] 55. Mamei, M. , Zambonelli, F. ; Spreading pheromones in everyday environments through RFID technology. In: 2nd IEEE Symposium on Swarm Intelligence, pp. 281 - 288. Citeseer (2005)
- [55] Mamei, M. , Zambonelli, F. ; Pervasive pheromone-based interaction with RFID tags. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* 2 (2) , 4 - es (2007) , doi: 10.1145/1242060.1242061
- [56] Martinoli, A. ; Collective Complexity out of Individual Simplicity. *Artificial Life* 7 (3) , 315 - 319 (2001)
- [57] Melhuish, C. , Wilson, M. , Sendova-Franks, A. ; Patch sorting: Multi-object clustering using minimalist robots, pp. 543 - 552. Springer, Heidelberg (2001) , doi: 10.1007/3 - 540 - 44811 - X 62
- [58] Menzel, R. , Giurfa, M. ; Cognitive architecture of a mini-brain; the honeybee. 5 (2) , 62 - 71 (2001) From Ants to Robots and Back 119
- [59] Meyer, J. , Guillot, A. , Girard, B. , Khamassi, M. , Pirim, P. , Berthoz, A. ; The Psikharpx project: towards building an artificial rat. *Robotics and Autonomous Systems* 50 (4) , 211 - 223 (2005) , doi: 10.1016/j. robot. 2004. 09. 018
- [60] Michelsen, A. , Andersen, B. B. , Storm, J. , Kirchner, W. H. , Lindauer, M. ; How honeybees perceive communication dances, studied by means of a mechanical model. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 30 (3) , 143 - 150 (1992) , doi: 10.1007/BF00166696
- [61] Mikheyev, A. S. , Tschinkel, W. R. ; Nest architecture of the ant *Formica pallidefulva*: structure, costs and rules of excavation. *Insectes Sociaux* 51 (1) , 30 - 36 (2004) , doi: 10.1007/s00040 - 003 - 0703 - 3
- [62] Miñri, S. , Floreano, D. , Keller, L. ; The evolution of information suppression in communicating robots with conflicting interests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (37) , 15786 - 15790 (2009) , doi: 10.1073/pnas.0903152106
- [63] Noldus, L. P. J. J. , Spink, A. J. , Tegelenbosch, R. A. ; EthoVision: a versatile video tracking system for automation of behavioral experiments. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 33 (3) , 398 - 414 (2001)
- [64] Noldus, L. P. J. J. , Trienes, R. J. H. , Hendriksen, A. H. M. , Jansen, H. , Jansen, R. G. ; The Observer Video-Pro: New software for the collection, management, and presentation of time-structured data from videotapes and digital media files. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 32 (1) , 197 - 206 (2000)
- [65] Ohashi, K. , D'Souza, D. , Thomson, J. ; An automated system for tracking and identif-

- ying individual nectar foragers at multiple feeders. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 64 (5), 891 – 897 (2010)
- [66] Pugh, J. , Martinoli, A. : Small-scale robot formation movement using a simple on-board relative positioning system. In: *Proceedings of the International Symposium on Experimental Robotics* (2006)
- [67] Reaney, L. T. , Sims, R. A. , Sims, S. W. M. , Jennions, M. D. , Backwell, P. R. Y. : Experiments with robots explain synchronized courtship in fiddler crabs. *Current Biology* 18 (2), R62 – R63 (2008)
- [68] Robinson, E. J. H. , Richardson, T. O. , Sendova-Franks, A. B. , Feinerman, O. , Franks, N. R. : Radio tagging reveals the roles of corpulence, experience and social information in ant decision making. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 63 (5), 627 – 636 (2008), doi: 10.1007/s00265-008-0696-z
- [69] Ruffier, F. , Franceschini, N. : Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance. *Robotics and Autonomous Systems* 50 (4), 177 – 194 (2005)
- [70] doi: 10.1016/j.robot.2004.09.016
- [71] Schwager, M. , McLurkin, J. , Rus, D. : Distributed coverage control with sensory feedback for networked robots, p. 49. The MIT Press, Cambridge (2007)
- [72] Sharkey, A. J. C. : Swarm robotics and minimalism. *Connection Science* 19 (3), 245 – 260 (2007), doi: 10.1080/09540090701584970
- [73] Sumner, S. , Lucas, E. , Barker, J. , Isaac, N. : Radio-Tagging Technology Reveals Extreme Nest-Drifting Behavior in a Eusocial Insect. *Current Biology* 17 (2), 140 – 145 (2007), doi: 10.1016/j.cub.2006.11.064
- [74] Tache, F. , Asadpour, M. , Caprari, G. , Karlen, W. , Siegwart, R. : Perception and behavior of InsBot: Robot-Animal interaction issues. In: *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics-ROBIO*, pp. 517 – 522. IEEE, Los Alamitos (2005), doi: 10.1109/ROBIO.2005.246321
- [75] Theraulaz, G. , Bonabeau, E. , Deneubourg, J. L. : Response threshold reinforcements and division of labour in insect societies. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 265 (1393), 327 – 332 (1998), doi: 10.1098/rspb.1998.0299 120 S. Garnier
- [76] Theraulaz, G. , Gautrais, J. , Camazine, S. , Deneubourg, J. L. : The formation of spatial patterns in social insects: from simple behaviours to complex structures. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 361 (1807), 1263 – 1282 (2003), doi: 10.1098/rsta.2003.1198
- [77] Tinbergen, N. , Perdeck, A. : On the Stimulus Situation Releasing the Begging Response in the Newly Hatched Herring Gull Chick (*Larus Argentatus Argentatus* Pont.) . *Behaviour* 3 (1), 1 – 39 (1951), doi: 10.1163/156853951X00197
- [78] Tschinkel, W. R. : Subterranean ant nests: trace fossils past and future? *Palaeogeogra-*

- phy, *Palaeoclimatology, Palaeoecology* 192 (1–4), 321–333 (2003), doi: 10.1016/S0031-0182(02)00690-9
- [79] Vaughan, R., Stumpter, N., Henderson, J., Frost, A., Cameron, S.: Experiments in automatic flock control. *Robotics and Autonomous Systems* 31, 109–117 (2000)
- [80] Vittori, K., Talbot, G., Cautrais, J., Fourcassi'e, V., Ara'ujo, A. F. R., Theraulaz, G.: Path efficiency of ant foraging trails in an artificial network. *Journal of Theoretical Biology* 239 (4), 507–515 (2006), doi: 10.1016/j.jtbi.2005.08.017
- [81] Vrinten, D. H., Hamers, F. F. T.: 'CatWalk' automated quantitative gait analysis as a novel method to assess mechanical allodynia in the rat; a comparison with von Frey testing. *Pain* 102 (1–2), 203–209 (2003)
- [82] Webb, B.: What does robotics offer animal behaviour? *Animal Behaviour* 60, 545–558 (2000), doi: 10.1006/anbe.2000.1514
- [83] Webb, B.: Can robots make good models of biological behaviour? *Behavioral and Brain Sciences* 24 (06), 1033–1050 (2001), doi: 10.1017/S0140525X01000127
- [84] Webb, B.: Using robots to understand animal behavior, vol. 38, ch. 1, pp. 1–58. Academic Press, London (2008), doi: 10.1016/S(X)65-3454(08)00001-6
- [85] Yan, Y., Tang, Z.: Control Architecture for Autonomous Multi-Robot System; Survey and Analysis. In: International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, USA, vol. 4, pp. 376–379. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2009)

第二部分

自重构模块化机器人

第六章 异构多机器人组织的 自优化自组装

Serge Kernbach, Benjamin Girault, Olga Kernbach

斯图加特大学并行与分布式系统研究所, 斯图加特大学 38 号, 70569, 斯图加特, 德国, e-mail: {serge.kernbach, giraulbn, olga.kernbach}@ipvs.uni-stuttgart.de

摘要: 本文致力于研究一种呈特定拓扑结构的异构机器人的仿生自组装, 其方法包括几种由生物调控网络启发而来的算法。这些生物调控网络用于实现生物的环境可靠性, 还包括基于约束的优化技术考量。这些技术用来寻找异构模块之间的最优连结, 从而解决了传感器信息的可扩展性和局部性问题。

1 介绍

自组装是一个重要的过程, 该过程利用简单的组装规则, 将一组已有的但无序的部件聚集为一个有序性良好的结构^[1]。这一过程通过使用集中自组织机制, 可在没有外部引导的条件下, 在宏观和微观尺度上发生。自组装算法的一个伟大的灵感源是分子自组装, 它的存在形式有晶体、胶体或者自组装的单分子层物质等^[2]。与机器人研究相关的主要是宏观自组装过程, 该过程通过将机器人模块聚集为复杂的拓扑结构, 来实现灵活多变的功能^[3]。

宏观自组装和微观自组装之间的重要区别不仅在于其部件的尺寸和功能, 还在于其中出现的问题和挑战。在微观尺度上, 各部件为分子, 它们依靠化学键力结合; 而在宏观尺度上, 各部件为机器人模块, 而且它们能够相互对接⁴。这些模块可以具有非常简单的结构⁵, 或者拥有几种认知功能, 比如感测、物体探测或识别、激励、通信以及其他⁶。微观自组装和宏观自组装的目标也不相同。微观尺度上的自组装通常是表现为一种均

匀结构模式的大规模现象⁷，而在宏观尺度上人们主要感兴趣的是创建具有所需功能的专用低尺度结构。一个典型例子是，这些结构为聚集的机器人，它们用行走、攀爬或者滚动的形式实现移动的功能。

微观自组装和宏观自组装之间虽然存在上述诸多不同之处，但它们同样也具有几种相同点，其中之一便是新单元的补充。我们可以发现几个受生物和化学启发的研究工作^{9]}，其中得到一种高效的补充策略^{10]}。然而，在两个尺度上的主要成就在于引导自组装^{11]}：形成所需的最终形式，得到该最终形式需要多个优化步骤。人工可编程性和自优化可由几种方式实现：我们在这里使用的一些思想来源于基因调控网络^{12]}，以及其多个算法的启发，比如文献[13]和[14]。另一个有趣的科学挑战是自调控机制的分布和在组装过程中出现的多约束集成。

本章在先前工作^{15,16]}的基础上，将它们扩展为两步优化，该优化发生在具体结构的高层次拓扑描述以及把模块组装为结构的过程中。第2节给出了自组装过程的共同点并讨论了主要的优化步骤，第3节介绍了几种在机器人—机器人组装过程中出现的约束，第4节考虑了约束—优化方法，第5节则致力于特定任务，比如成组或者拓扑的扩展，最后在第6节得出了一些结论并在第7节总结该工作。

2 一般的自组装方案

可重构机器人中机器人的自组装和自拆解问题是众所周知的，见文献[17]或者[18]，其中区别了几种高维和低维方法^[15,19]。为了在定义中更有说服力，我们将自组装定义为一种过程，在该过程中机器人模块 R_i 建立双方的连接 $R_k: R_p$ （表示为模块 R_k 与 R_p 之间的对接，见图1(a)），该过程一步一步地进行，最终使得形成拓扑 Φ 的表现。

每一个拓扑 Φ 都具有一些宏观功能，更确切地讲，每一个特定的连接 $R_k: R_p$ 引入一个自由度(DoF) φ_i 。如图1(b)所示，模块间的每一个连接只引入一个DoF，通过将所有DoF组合，整个组织就能够实现一种集体移动。我们将所有 φ_i 之间的相互作用表示为一种人工组织的宏观功能 F 。图1(c)和图1(d)提供了旋转和有轮子的宏观功能的两个例子。 Φ 和 F 间的关系相对复杂，它不只依赖于所包括的DoFs，还依赖于环境，这些问题将在下面的第二个评论中讨论。

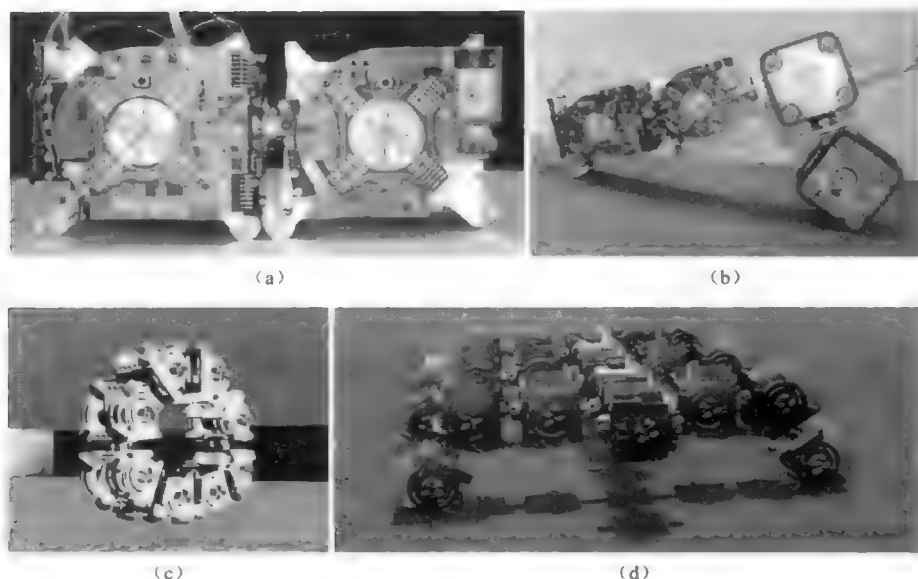


图1 图(a)为双边连接 $R_k: R_p$ 的例子;图(b)中几个1DoF连接生成一种宏观运动;图(c)和图(d)是由许多机器人模块实现的宏观功能的两个例子(见书后p. 16 彩图1)

自组装过程可分解为不同的步骤,如图2所描述的。首先,将不同类型的机器人模块 R_i 和其他物体(比如能量“立方体”)置于场景中,见图2(a)。在这一阶段,所有机器人以所谓的群模式存在,即独立的机器人。在第二个步骤中,它们从可能存在的拓扑中选择一个小的子集 Φ^s ,对于给定的环境条件它是最优的。这些拓扑所需的这种模块成组聚集在场景中的一些区域,如图2(b)所示,这种成组方法将在第5.1节介绍。在第一次优化后,机器人将进行第二次优化,其中将一组 Φ^s 简化为一个 Φ 。机器人考虑了在聚集点处模块的数量、它们的能力和对于所需功能 F 来说它们的可用性。最后,所选择的模块以一个合适的空间秩序排队以便于对接,如图2(c)所示,并对接为一个组织,如图2(d)所示。这里机器人使用不同的补充方法来将一个机器人加入现有的拓扑中,比如文献[10]中所提供的。在对接成功后,所有机器人模块将以所谓的组织模式存在,即它们之间相互依赖。

如图2所示的普通方案,只表示了实际机器人自组装过程中的主要阶段,对该方案我们将做出两点评论。

① 在线/离线问题。第一个评论是关于如何得到最终拓扑 Φ 的方法,

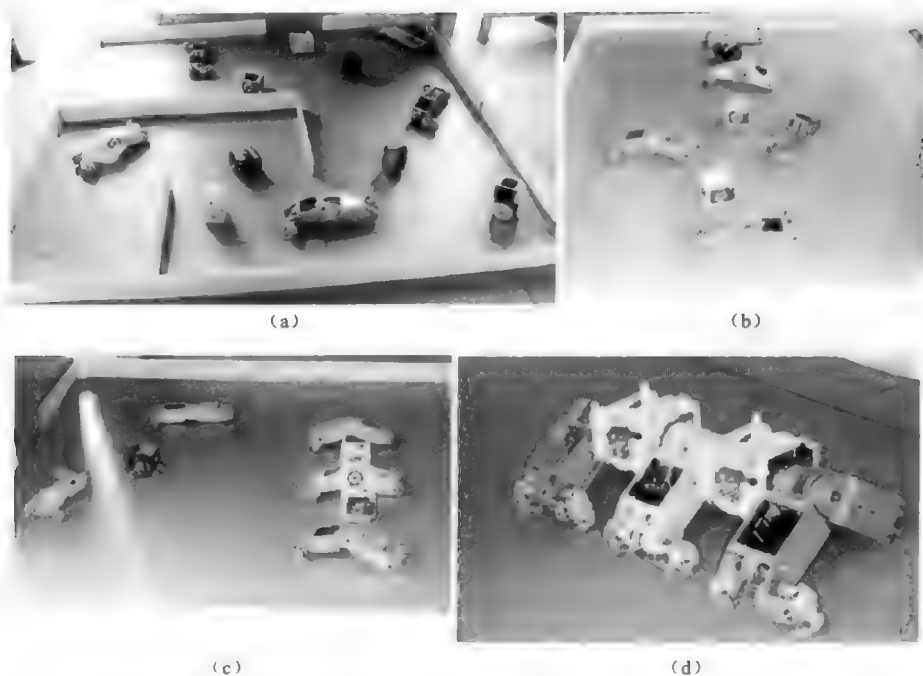


图2 自组织方案中不同的设想步骤。图(a)为初始阶段——所有机器人在场景中不规则地分布；图(b)中，所选模块接近以便对接；图(c)中，模块以2D断开的形式排序；图(d)中，模块在2D栅格上对接为一个组装组织并集体激励成为3D状态（见书后 p. 16 彩图2）

该方法来源于文献 [15]，并存在于下面的思想中。可将为集 $\{\Phi\}$ 预先生成的基本组成部分最大化，从而可以覆盖在可预测的不同环境条件中在功能上绝大多数有用的行为。例如：它可以通过离线的进化模拟，通过使用由昆虫或动物而来的仿生机制来实现，而且它通常是提前进行。这些构型在结构上会受到一些模块的在线干扰，干扰程度取决于环境。这种干扰使其与所期望的功能和行为之间产生了偏离，但可以通过不同的在线适应性机制来处理。这将最终使集 $\{\Phi\}$ 简化为 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$ ，它们在一个具体的环境中具有实际意义，将这个更小的集表示为 Φ^s 。这样，寻找一个特定解的问题就缩小为最优化一个从其中一个预先产生的构型偏离的问题，其中所有的控制机制都存在。由于一个线性优化非常迅速，例如线性分配问题具有 $O(n^3)$ 阶复杂度^[20]，所以，这种方法可机载在线运行。

② 拓扑、功能和环境。通常，机器人 R_k 和 R_p 之间的自由度 φ_i 取决于 R_k 和 R_p 两者，即我们可以遇到下面几种情况： R_k 和 R_p 两者都有关，与其

中一个有关,或者没有一个有关,详见文献[16]。再者,一个组织的常用功能由所有 φ_i 之间的相互作用决定,对于一个特定的环境很难提前说明哪一个功能是有用或者无用的。开发功能的有用性有两种可能:进行 on/off-board 仿真或者在真实环境中使用不同拓扑的试错法,两者都具有其优点和缺点,并在寻找 Φ 中进行了使用。这其中重要的科学挑战是自组装的可编程性和其对不同环境的依赖性(机器人的约束),我们需要在拓扑的需求(设计目标)和对环境扰动的适应能力之间找到一个平衡点。

所以,自组装需要两步优化:

- 第一步,从 $\{\Phi\}$ 到 Φ^S 的拓扑的环境可靠性生成。我们可以将这一过程表示为拓扑从一些普通的类基本组成单元描述(通过与基因表达过程对比)到一组具有期望功能特性的拓扑的表达式,这种方法的例子在文献[15]中进行了讨论,我们在其中定义了一组算子和用来生成拓扑的基本单元。

- 第二步,考虑当前环境并根据组装区域中机器人的数量、对接的可用性、局部环境的结构、组装动力学(比如碰撞数量)以及其他条件,来对 Φ^S 进行优化。其结果是,机器人首先产生一个最终的拓扑 Φ ,然后第二步开始对接接近。

图3中阐述了这两步过程,整个方法由三个功能部件(F1~F3)和三个描述性部件(D1~D3)组成。每一个功能部件实际上代表一种在机器人模块上机载运行的控制器,其执行过程为输入一个相应的描述,执行所有必要的活动,并产生一个输出描述。其后,对机器人的控制传给下一个控制器。这样,描述D1~D3自身在控制器和控制器之间的相互联系,其工作在某种程度上就像在D1~D3上的操作。F1和F3控制器的主要思想已经在文献[15]和[10]中提出,下面我们主要关注F2优化控制器并对其进行详细介绍。

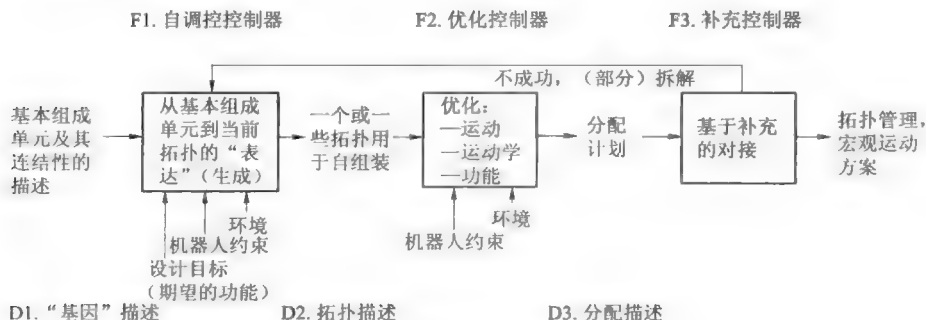


图3 自组装方案的一般描述

3 优化控制器：从 Φ^S 至 Φ 的转变以及约束的作用

在优化控制器阶段的自组装有几个目标任务：机器人成组、约束的识别和收集、满足约束的拓扑的选择，以及最后的从一组可能的拓扑 Φ^S 中生成一种具体的拓扑 Φ 。有几种方式来实现，首先，将 Φ^S 与当前条件进行比较。例如：当其他机器人已经在建造某一种结构，该结构在决策过程中具有较高的优先级；当现在没有这种结构时，机器人对已知的机器人的当前位置进行比较，以此来决定哪一种构型最适于这种构造或者哪一种构型最适于给定的表面。当选择了一种构型后，为了决定该构型中的一个位置，机器人求解约束分配问题，这一位置也是它所对接的位置。

其次，当一个机器人做出了关于 Φ^S 中其中一个构型的决定后，而它又不受这一构型约束，机器人能够由模板干扰该构型 ϕ_i 。这种情况只发生在下面的两种情况中。第一种情况，为 n 个机器人生成的构型已经拥有 n 个机器人，加入该组织的第 $n+1$ 个机器人则开始建造一个新的可扩展核。例如：当一个含有 n 个机器人的组织拥有四条腿，第 $n+1$ 个机器人能够开始建造另外一条腿。第二种情况，基于对环境的观察，机器人能够估计面对特定扰动时的需要。例如：建造更长的腿来越过一些障碍物。然而，困难在于其他机器人可能并不知道这一提议，从而使得整个构型变得不同步。这一问题的解决方法是使机器人之间拥有更多的通信，比如文献 [15] 中所研究的。

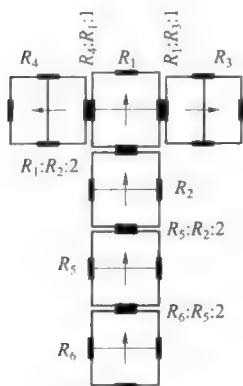


图4 一个组织的拓扑，
 $R_k: R_p: x$ 是一个连接占位符

将一个组织的拓扑 Φ 由连接占位符 $R_k: R_p: x$ 和该连结中的自由度功能表示。比如在图4中，其中有六个模块，该拓扑由五个连结占位符描述，在每一个 $R_k: R_p: x$ 中，最后一位“ x ”表示 DoF：1 意味着横连，2 意味着向前连接（连接两模块 R_1 和 R_2 只有两种方法）。机器人之间映射的产生以及连接占位符代表了一种经典的约束分配问题。选择一个同伴 R_i 进行对接，即 $x_i^j \leftrightarrow x_k^j$ 的产生，独立于相互连接的两机器人。它需要满足几个要求：首先，它需要满足局部约束 v_i ；其次，每一个 $x_i^j \leftrightarrow x_k^j$ 具有一个相关的本地成本；最后，整个

呈现的拓扑具有其自身的全局成本。

1. 连接性约束

就像前面所提出的,有多重约束施加于连接、运动学特性、异构性以及其它。通常,连接意味着连接到每一个模块的单元的数量,例如:位于交叉点上的中心单元具有连接4(模块从每一侧连接)。连接限制了连结的数量,并可有效用于拓扑的描述中。如果 c_i 为第 i 个单元的连接性,拓扑 Φ 可描述为 $n+1$ 集 $(c_1, c_2, \dots, c_n, c_t)$, c_t 为拥有 n 个机器人的拓扑中连结的总数,其中 i 为 $1 \sim n$ 的整数(n 为拓扑中机器人的数量;而 N 为机器人的总数)。在通常情况中, c_i 的最大值等于平台的最大连接。将所有 c_i 按 $c_{\max} \sim c_{\min}$ 重新排序,从而使得第一个单元 c 通常为具有最大连接度的那一个。拓扑 Φ 可描述为:

$$\Phi = \{c_{\max}, c_{\max-1}, \dots, c_{\min+1}, c_{\min}, c_t\}, c_i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (1)$$

由式(1)定义的描述具有不同的拓扑特性,详见文献[16]。通常,如果拓扑结构连贯,则存在一些独特的基本拓扑(连贯拓扑=没有不相连的节点)。为了消除未连接的拓扑,需要在约束满足问题(CSP)和约束优化问题(COP)求解器中引入连贯性约束。基本拓扑会受到一个或者几个模块的干扰,这就增加了 n 和 c_i ,这种受扰动的拓扑并不是唯一的,解决扰动拓扑的一种可能的方法,在文献[15]中已给出。

2. 运动学约束

由式(1)定义的拓扑 Φ 所建立的连结与机器人的ID无关。为了将运动学引入拓扑中,在 Φ 中应当补充一个功能描述,即包含一个特定连结的期望自由度 φ_i 。由于每一个节点具有其最大4个连接(即一般情况中不同的 φ_i),所有功能拓扑中应当包含所有的可能连接。我们约定,当为一个连接只指定一个 φ 时,其意思是 $\varphi_i = \varphi$ 。现在我们可以从式(1)归纳 Φ :

$$\Phi = ((c_{\max} : \{\varphi\}_{\max}), (c_{\max-1} : \{\varphi\}_{\max-1}), \dots, (c_{\min} : \{\varphi\}_{\min}), c_t) \quad (2)$$

这样, φ 定义了一个施加于 $R_k: R_p$ 连接上的运动约束,下面我们将更加正式地介绍几个特性。

定义1(功能约束)。如果 φ 满足:

$$\varphi = ((T_1, D_1), (T_2, D_2)) \quad (3)$$

则是一个功能约束。其中 T_i 为模块 i 的种类, D_i 为参与对接的模块 i 的对接种类,模块1为具有这种约束的模块,而模块2为其他种类的模块。

从功能约束的观点出发,拓扑 Φ 可定义为:

$$\Phi = ((c_1, (\varphi_{1,1}, \dots, \varphi_{1,c_1})), \dots, (c_n, (\varphi_{n,1}, \dots, \varphi_{n,c_n}))) \quad (4)$$

如果变量(见本文第4节中关于CSP方法的描述)的值为实数,意味着在

节点间存在一个连接, 而如果其值为虚数, 则不存在这种连接。如果在环境中没有动态障碍物存在, 连接的成本即为两节点对接的成本。约束是优化步骤中最棘手的部分。首先, 我们想要一个非循环连接的拓扑结构, 也即在拓扑中没有连接回路, 当下列两种特性成立时, 这种拓扑可以实现:

- 特性 1 (连接拓扑的表征)。当且仅当 $i \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ 节点的每一个子集中具有至少一个连接包含了其中一个节点至组中互补节点子集的一个节点时, 则认为该 n 节点拓扑是连接的。
- 特性 2 (非循环连接图表征)。当且仅当拓扑精确地具有节点间的 $n-1$ 个连接时, 则该连接拓扑是非循环的。

这种拓扑实际上是一种树, 现在从这两个特性出发写出 LP 求解器的约束相对较为容易且直接。每一个 $i \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ 子集将会有有一个约束, 而且有一个约束用来检验拓扑是否非循环, 这样可以保证所产生的拓扑是单个的树。

最后, 我们列入功能约束, 但在列入前我们需要将整个优化过程分为两个阶段: 约束满足问题和约束优化问题。CSP 由运行的 LP 求解器组成, 该求解器给定节点上约束的分配。我们假设该分配有效, 即节点的类型与约束类型相容。然后我们增加一个约束以保证有足够的连接满足功能约束, 例如: 如果节点 i 至少需要对接 A 型的 N_A 和 B 型的 N_B 时, 则这里将至少需要两个约束来验证节点 i 上 A 类型 (或者 B 类型) 的连接数大于或者等于 N_A (或者 N_B)。

3. 本地成本

机器人具有不同的机载能力来测量机器人之间的距离、它们的方向、相对旋转和其他参数^[21]。此外, 如图 5 (a) 所示, 机器人不仅能够测量其直接临近物的距离, 还能够测量任何与可见物体或机器人之间的距离。然而, 距离机器人越远, 测量的精度越低。再者, 如图 5 (b) 所示, 只有可见机器人才包含在本地成本矩阵中。

R_i 和 R_j 间的测量距离 $S_{i,j}$ 是对接的其中一个本地成本: R_i 和 R_j 相互之间越接近, 它们的对接 $x'_i \leftrightarrow x'_k$ 越“便宜”, $x'_i \leftrightarrow x'_k$ 的其他成本有: 距离成本 αS_{i-k}^{i-j} 、旋转成本 βS_{rot}^i 、“隐性”成本 S_{k-hid}^i , 其中 α 、 β 为系数。成本 S_{k-hid}^i 为机器人 R^i 对其周围条件未知造成的代价。例如: $x_1^1 \leftrightarrow x_1^2$ 之间的连接成本为 $S_{1-1}^{1-2} = \alpha S_{1-2}^{1-2} + \beta S_{rot}^2 + S_{1-hid}^2$ 。更一般地, 本地成本也可以包含其他因素, 它确定了一个特定连接的值。所有 $x'_i \leftrightarrow x'_k$ 的所有本地成本都包含在

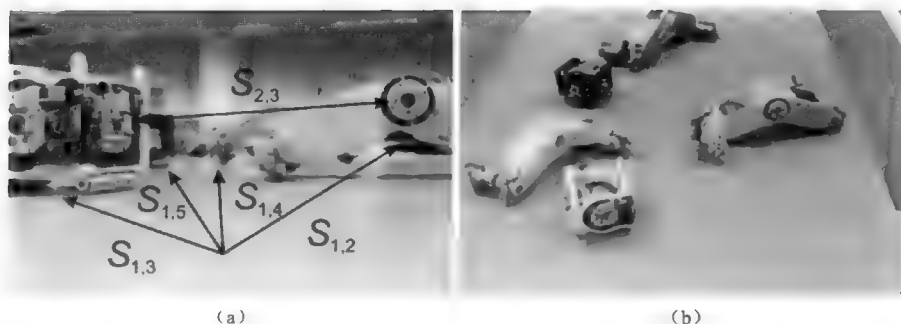


图5 (a) 从机器人观点出发的本地成本；(b) 全局观点，其中一些机器人不可见（见书后 p. 17 彩图 5）

本地成本矩阵 \underline{S} 中。

由于形态是分布式的且以其自身为中心，所以 $x_i^i \leftrightarrow x_k^i$ 和 $x_k^i \leftrightarrow x_i^i$ 的生成是对称的，即从模块 R_i 的角度出发的 R_i 和 R_j 之间的连接成本可能与从 R_j 模块角度出发的 R_j 和 R_i 之间连接的成本不同。由此导致的影响是，模块 R_i 只能精确地知道其自身的本地成本，所有其他成本只能粗略估算。

4. 全局成本

全局成本问题代表了一种关键点，一般情况下，它代表了整个组织对环境适应性的好坏，而且对于一个特定的环境可以表示为运动速度、能量消耗、重量以及其他全局因素。通常，它需要对不同构型进行多重测试，而且非常昂贵，或者是在真实环境中的在线估测几乎是不可能的。所以建议使用一组不同的先验测试拓扑，而其在不同环境中的全局成本是已知的。在实验过程中，机器人必须与它们集体工作时的构型一致，这取决于工具和感知环境的可用性。

4 基于约束的优化

就像在文献 [15] 和 [16] 中所描述的，基于约束的优化问题可用两种不同的方法表示。第一种方法如图 6 (a) 所示，它考虑一种为每一个 $ID_i \rightarrow R_i$ 的经典分配，其中 ID_i 为机器人的 ID， R_i 为机器人在拓扑中的标签。下表中的横向展示了 $ID_i \rightarrow R_i$ 之间的所有可能排列的成本，纵向展示了由图 6 (a) 中得到的连接 $R_i \rightarrow R_j$ 成本矩阵（成本示例）具有如下形式：

	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	2:3	2:4	2:5	2:6	3:4	3:5	3:6	4:5	4:6	5:6
1:2	35	40	80	36	30	41	42	31	32	20	55	23	60	21	32
2:3	35	40	80	36	30	41	42	31	32	20	55	23	60	21	32
2:4	35	40	80	36	30	41	42	31	32	20	55	23	60	21	32
4:5	35	40	80	36	30	41	42	31	32	20	55	23	60	21	32
5:6	35	40	80	36	30	41	42	31	32	20	55	23	60	21	32

(5)

其中的分配满足：

$$C_{ID_2 \rightarrow R_2} = \sum_i \sum_j S_{i,j} = 3 \tag{6}$$

约束 (6) 为主要核心单元 R_2 的连接度。图 6 (a) 中的问题可描述为比如二次分配问题 (QAP)，见文献 [22]；或者描述为约束满足问题 (CSP) 和约束优化问题 (COP)，见文献 [23]。由于 QAP 是一种 NP 型复杂问题，所以我们使用 CSP + COP 的方法求解该问题。在求解分配问题时，对所有单元考虑式 (6)，可得到下面的分配矩阵：

	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	2:3	2:4	2:5	2:6	3:4	3:5	3:6	4:5	4:6	5:6
1:2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
5:6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

(7)

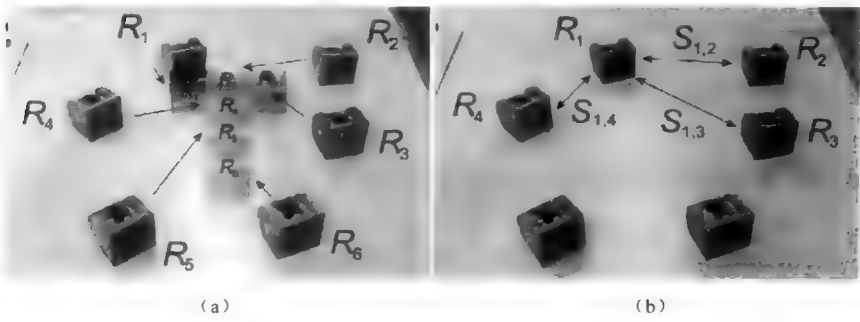


图 6 组装问题的例子。图 (a) 是基于为每一个 $ID_i \rightarrow R_i$ 分配的方法；图 (b) 是基于为具有 $S_{i,j}$ 的目标函数 Θ 进行线性规划的方法（其中只显示了对 R_1 的连接）（见书后 p. 17 彩图 6）

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} c_{\max} \\ c_{\max-1} \\ c_{\max-2} \\ c_{\min+2} \\ c_{\min+1} \\ c_{\min} \\ c_i \\ \gamma \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{或者} \quad \underline{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 5 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

就像前面所提出的, c_i 与机器人不连接, 也即我们必须建立 c_i 成组的与这些机器人间所有可能组合之间的映射:

$$(c_{\max}, c_{\max-1}, \dots, c_{\min}) \rightarrow \text{排列}(R_1, R_2, \dots, R_n) \quad (12)$$

由于排列数等于 $n!$, 绝大多数微处理器的计算能力对低于 10 的 n 计算接近其实际时间, 这对大多数核已经绰绰有余。复杂的拓扑可通过可扩展性来创建, 因为变量 x_i 指向由式 (12) 定义的机器人之间的连接, 所以矢量 \underline{b} 等于按 c_{\max} 至 c_{\min} 的顺序的组 c_i , 矩阵 \underline{A} 创建相应的占位符。关于该方法有几点评论。

① 所有拓扑具有一列相关约束 γ , 比如机器人总数 N 或者异构模块的需求。再者, 每一个拓扑都具有一系列全局成本: 能量消耗、在正常表面上的运动速度、可用该拓扑处理的凹凸不平障碍物的几何结构或者对接单元的可能结构。

② 在自组装开始之前, 机器人检查 N 个可用机器人是否与可能拓扑组匹配。例如: 如果拓扑需要 $\{15, 17, 22, 25\}$ 机器人, 但只有 20 个可用机器人, 那么它们只能够自组装入前两个拓扑中。

③ 有几个拓扑需要工具或者专门化的机器人, 机器人应当检查这些专门化机器人的可用性, 并相应地限制可能拓扑组。

④ 自组装从那些具有最高连接度的核心单元开始, 当这一核心单元已经建立, 机器人将考虑下一个具有较低连接度的单元, 并依次进行下去, 直到整个结构组装完成。

⑤ 当所选择的拓扑已经组装了一部分, 并且有更多的自由机器人到达组装区域, 则机器人能够决定在已经组装的结构上创建一个新的核, 而不是拆解并重新组装, 条件是拓扑可以在核的数量上进行扩展。

5 成组和缩放方法

前面一节描述的基于 CSP/COP 的优化方法是一种由组装区域中每一个模块完成的分布式和分散的过程，不能将其描述为单个任务来完成，整个方法依靠模块间的相互作用以及机载运行的特定优化过程。本节中我们关注两个其他任务，它们先于或者在 CSP/COP 优化之后，这两个任务是在 $N > n$ 不同情况中的成组和缩放方法。

5.1 成组方法

当拓扑中可用机器人的数量 N 大于所需模块的数量 n 时，这种情况中需要使用成组技术。这样，对于 $N > n$ ，我们需要选择参与到聚集中的模块。第一个思想是选择 n 个最近的模块，这种策略对于那些对模块类型没有任何约束的拓扑有用，但对于其他情况则失效。所以，我们首先需要考虑临近模块的类型；其次，如果一个临近模块已经属于一个完成的拓扑，则需要将其从可用机器人列表中去掉；再者，机器人可以具有其内部的约束，从而使得它的某些运动比其他机器人更难。例如：非完整机器人将不能进行横向移动，直线向前移动比其他方向上的移动更加“便宜”，这样，从 A 的角度看， A 和 B 之间的距离将成为 A 到达 B 的复杂度。

为了进行成组，可以考虑使用一个简单的函数来迭代地选择每一个相邻最近的模块，但这将导致一个非最优结果。为了实现成组优化，应用 LP 求解器最适合。由 LP 求解器为每一个临近模块分配一个布尔值：当且仅当该模块被选为组的一部分时，布尔值为真。目标函数为呼叫模块与所选的临近模块之间的距离（就像在前面一节中描述的那样）的和。所涉及的约束为所选模块的数量（等于拓扑中模块的数量）和约束类型（至少有足够量的拓扑约束类型所需的给定类型机器人）。

5.2 缩放方法

有两种情况需要考虑自组装的缩放。首先是我们经常遇到的一种情况，当可用机器人的数量 N 大于拓扑中机器人的数量 n 时，这里有几种应对策略，将在下面考虑。第二种情况是，具有 n 个机器人的拓扑能够并入另一个具有 m 个机器人的拓扑中，这时缩放问题成为 $n + m$ 拓扑的生成问题。在基本硬件模块可用于这种功能时，这种问题可通过变形算法来解决。在我们的情况中，对于 $n + m$ 拓扑问题，我们通过对一个拓扑进行拆

解并将自由机器人组装入另一个拓扑中来解决。

就像前面提到的,在第一种情况中,有几种可能的方法来缩放与 n 关联的 N :

(1) 对于 $N = xn$, $x = 1, 2, 3, \dots$, 具有 n 个机器人的拓扑能够被复制 x 次,每一个这些新的拓扑是一个独立的结构。这是一种最简单的缩放形式,可以表示为行为缩放。

(2) 从前一种情况中而来的 x 个拓扑能够并入一个共同的结构,典型情况为分割体搭建,其中在一个分割中的 n 个机器人复制 x 次。这种方法为结构缩放。

(3) 从 $N \bmod n > 0$ 而来的机器人不能够创建一个新的拓扑,这些机器人对于已经存在的拓扑仍然有用,比如作为能源储备,所以这些机器人能够干扰拓扑 Φ 。这种方法为摄动缩放。

(4) 最后, $N \bmod n > 0$ 的机器人并不与其他结构聚集,它们将为比如自修复创建一个“储备”。

文献 [16] 中和本文中进行的实验表明,策略 (1) 和 (4) 的组合对于创建多重人工组织是一种最有用的方法,在第 6 节中描述的所有结构都使用该策略。对于策略 (2) 和 (3),则需要重新计算运动约束,此时需要使用混合拓扑运动技术,这在文献 [24] 中进行了描述。

6 执行情况 and 结果

我们使用实际机器人并通过仿真进行了几个系列的实验,在实际平台上的执行是为了测试计算能力并估计在创建目标函数 Θ 过程中的失真程度。由于目前没有足够的机器人用来验证可缩放性,所以我们在 AnyLogic 上进行了几组仿真实验。为了解决 CSP 问题而执行 LP 求解器的过程中,我们使用了混合整数线性规划求解器 (C++ 版用于实际机器人,Java 版用于模拟) 中的 lp_solve 5.5 常规方法 (见 lpsolve.sourceforge.net)。机器人使用 Blackfin 双核处理器作为主 CPU (在每一个模块中),它具有 64 MB 机载 SDRAM。机器人场景接近机器人尺寸的 50 倍。为了测量实验时间,我们使用“自主周期的迭代”概念,它是机器人的一个内部值,使得可以更精确地估测到 CSP/COP 方法步骤 (而不是机器人的运动) 的运行时间。使用两种拓扑进行测试:如图 4 所示的 T 形形式和蛇形,这些拓扑结构同样被用在缩放性的测试中。除了文献 [15, 16] 提出的实验外,这里我们为成组方法开发了不同的策略并探索了成组方法对一种性能的影响,还在

不同比例参数下测试了自组装的性能。

成组方法。就像在 5.1 节提到的，在自组装前成组是一个必不可少的步骤，它为了构建一个拓扑，可以从 N 个机器人群中选择 n 个合适的机器人。在执行一个成组策略时会遇到几个困难：

首先，机器人相互之间并不是经常可见（见图 7），即估测离组最近的机器人在许多情况下是不可能的。

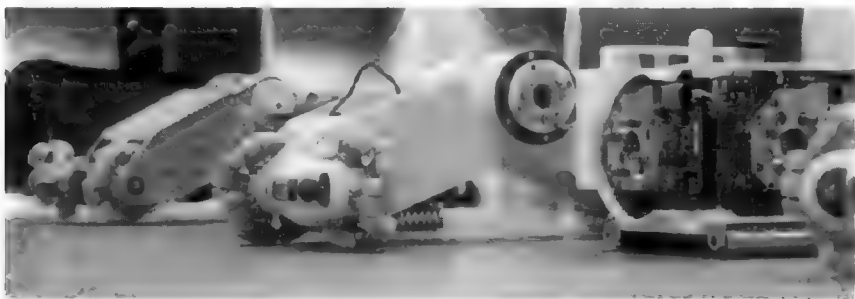


图 7 自组装方法的排序阶段。五个机器人相互接近并移动至右侧空间位置以便于创建一个如图 2（d）所示的拓扑。在该接近过程中，可以观察到大规模的防撞行为。

在执行策略过程中，当一个机器人与已经包含在组中的至少一个机器人可见时，则将该机器人加入到组中。按照“先见先得”的原则来分配组。当一个机器人收到一个加入组的邀请时，它可以确认或拒绝该邀请；当没有接受其他邀请时，机器人会确认它加入该组的意图，并向可见的邀请机器人移动。当机器人与组的距离足够近时，它将启动 CSP/COP 程序并等待分配问题的解答。在此以后，机器人将移动至正确的空间位置（排序阶段）。

为了评估这种策略的性能，我们使用两种其他方法：一种是基于 WiFi 连接任意选择一个候选机器人加入组（即没有位置信息），另一种是一种理想情况，即只有最近的机器人受邀加入组（通过使用全局信息）。图 8 中绘制了基于临近的成组策略的自组装和随机成组的自组装的性能曲线，在图 8（a）和图 8（b）中将性能估计为组中所有机器人间距离 s_i 的和，而在图 8（c）和图 8（d）中将性能阐述为所有机器人间距离 s_i 的和。图 8（d）表示了拥有最近的临近机器人的理想情况。从图中我们可以发现，为分组而选择机器人对组装策略具有影响，在所进行的许多实验中，它可以将近时间减少 30% ~ 50%，并使得排序阶段更加容易。在理想情况下，排序阶段几乎是在实验启动后立即发生。

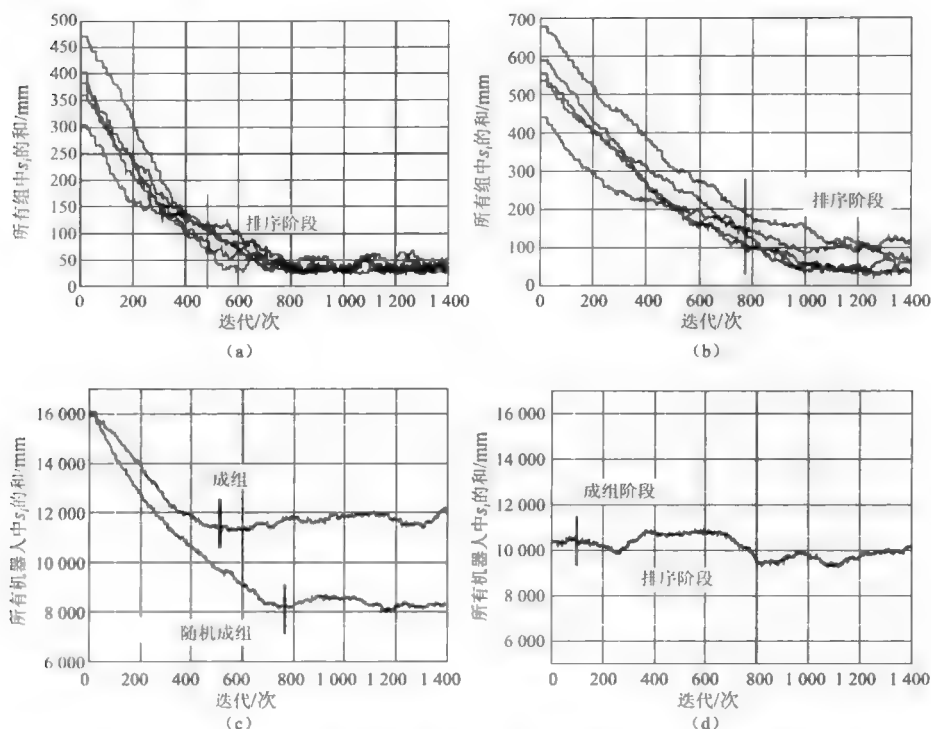


图8 不同的成组策略, $n=5$, $N=25$ 。图(a)中, 局部可见机器人与其他机器人之间的成组, 图中显示为每一个组中机器人之间所有距离的和; 图(b)则为随机成组, 所有机器人均匀分布在场景中, 图中显示为每一个组中机器人之间所有距离的和; 图(c)是两种策略的比较, 图中显示为所有机器人的 s_i 和; 图(d)是理想的分组策略, 图中显示为所有机器人的 s_i 和

进行第二系列的实验来研究自组装策略的缩放性能, 该实验的思想来源于文献 [16], 其中我们提出增加机器人的连接度, 它通过所有机器人移动至场景中的特定点 (它是右上拐角处, 可以使用罗盘信息来接近) 来实现。当所有机器人相互之间接近到一定程度时, 它们能够进行较快速的成组, 建立成本矩阵并排序。但所遇到的问题是, 机器人中大量增加的碰撞会减慢性能, 而且实验中所参与的机器人越多, 碰撞的次数越多, 组装的速度也就越低。图9中研究了不同成组策略和不同数量 N 的机器人的碰撞数。我们发现碰撞行为具有两个容易观察的阶段: 成组过程中的低斜率阶段和排序过程中的高斜率阶段。排序阶段的斜率对于所有策略几乎相同, 并且与模块的数量无关。这可以由图7来解释, 从图7中我们可以发现, 排序阶段引起了距离的局部防撞行为, 所以与总的模块数无关。但

是,不同的成组策略具有不同的碰撞性能。可以从图9(c)中看出,基于临近的成组具有最优的缩放特性(基于与 N 无关);而对于基于随机的策略,尤其是具有优先感测半径时,当增加机器人数量时,具有一个较差的性能。在我们的早期实验中也同样观察到了这种行为。这样,最佳的缩放策略是不只在聚集过程中增加所有机器人的局部水平,而且需要增加成组阶段的水平。

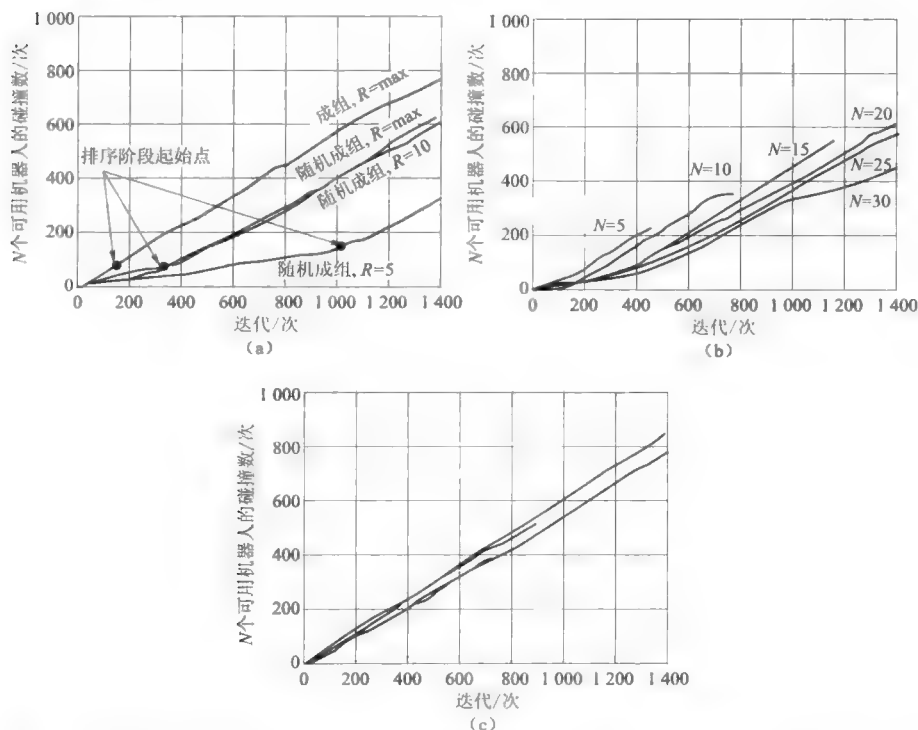


图9 用实验运行时间内的碰撞数量表征的缩放性能。 R 为感测半径, $R=\max$,表示机器人能够观察到整个场景; $R=5, 10$, 机器人能够观察到5~10个机体长度范围。图(a)所示为缩放性与不同成组策略和不同可视半径间的关系;图(b)为具有随机成组和最小感测半径的策略,图中所示为不同的 N 个机器人的碰撞;图(c)为具有临近成组的策略,图中所示为不同的 N 个机器人的碰撞

7 结论

本章致力于研究自组装策略,该策略应用了在生物调控网络中已知的生成和优化方法。这里我们主要关注优化控制器,它将所产生拓扑组的范

围缩小至对模块之间连接的一个特定描述,并进行由目标函数定义的局部优化。目标函数考虑了连接性约束和功能约束、本地成本和几个全局成本。由于成本和约束的灵活性,该方法对于具有不同结构和功能的模块,比如异构可重构机器人,非常有用。

在实验部分,我们主要研究了成组策略,以及这种不同策略和不同 N 时的缩放性能。这些结构是已经报道结果的补充。我们预计,基于临近的成组,即使没有进行全局意义上的优化,也能够提供较短的聚集事件,这是因为其空间优化过程。空间成组的非最优性显著受到探测临近机器人能力的限制。为了改进性能,我们提出通过将所有机器人预先聚集在机器人场景中的一个特定区域来增加局部等级。在先前的实验中,这种策略会由于机器人之间的大量防撞行为而带来多重瓶颈。而在改进的方法中,当选择了局部成组时,预先聚集的自组装能够很好地缩放为不同的 N ,其中有针对 $n=5$ 和 N 位于 $5 \sim 30$ 之间的测试。

对于将来的工作,我们希望通过使用三种不同类型的机器人来验证图 2 所示的拓扑测试,当然还包括通过那些非常简单的机器人(比如化学分子)来研究环境条件的影响,以及预测是否有可能将宏观研究得到的结果转移至微观自组装中。

参考文献

- [1] Ariga, K., Hill, J. P., Lee, M. V., Vinu, A., Charvet, R., Acharya, S.: Challenges and breakthroughs in recent research on self-assembly. *Science and Technology of Advanced Materials* 9 (1), 014109 (2008)
- [2] Whitesides, G. M., Kriebel, J. K., Love, J. C.: Molecular engineering of surfaces using self-assembled monolayers. *Science Progress* 88, 17–48 (32) (2005)
- [3] Levi, P., Kernbach, S. (eds.): *Symbiotic Multi-Robot Organisms: Reliability, Adaptability, Evolution*. Springer, Heidelberg (2010)
- [4] Chiang, C. - J., Chirikjian, G.: Modular robot motion planning using similarity metrics. *Auton. Robots* 10 (1), 91–106 (2001)
- [5] Miyashita, S., Hadorn, M., Hotz, P. E.: Water floating self-assembling agents. In: Nguyen, N. T., Grzech, A., Howlett, R. J., Jain, L. C. (eds.) *KES-AMSTA 2007. LNCS (LNAI)*, vol. 4496, pp. 665–674. Springer, Heidelberg (2007)
- [6] Castano, A., Shen, W. - M., Will, P.: Conro: Towards deployable robots with inter-robots metamorphic capabilities. *Journal of Autonomous Robots* 8, 309–324 (2000)
- [7] Samori, P., Francke, V., Müllen, K., Rabe, J. P.: Self-assembly of a conjugated

- polymer; From molecular rods to a nanoribbon architecture with molecular dimensions. *Chemistry-A European Journal* 5, 2312 – 2317 (1999)
- [8] Kernbach, S. : Towards application of collective robotics in industrial environment. In: Rigatos, G. (ed.) *Industrial Systems: Modelling, Automation and Adaptive Behaviour*, pp. 18 – 49. IGI Global (2010)
- [9] Yu, C. – H. , Haller, K. , Ingber, D. , Nagpal, R. : Morpho: A self-deformable modular robotinspired by cellular structure. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008, pp. 3571 – 3578 (2008)
- [10] Liu, W. , Winfield, A. F. T. : Autonomous morphogenesis in self-assembling robots using IR-based sensing and local communications. In: Dorigo, M. , Birattari, M. , Di Caro, G. A. , Doursat, R. , Engelbrecht, A. P. , Floreano, D. , Gambardella, L. M. , Groß, R. , S, ahin, E. , Sayama, H. , Stützle, T. (eds.) *ANTS 2010. LNCS*, vol. 6234, pp. 107 – 118. Springer, Heidelberg (2010)
- [11] Huie, J. C. : Guided molecular self-assembly: a review of recent efforts. *Smart Materials and Structures* 12 (2), 264 (2003), <http://stacks.iop.org/0964-1726/12/i=2/a=315>
- [12] Davidson, E. H. : *The Regulatory Genome: Gene Regulatory Networks In Development And Evolution*. Academic Press, London (2006)
- [13] Jacob, C. , Burleigh, I. : Genetic programming inside a cell. In: *Genetic Programming Theory and Practice III*, vol. 9, pp. 191 – 206. Springer, Heidelberg (2005)
- [14] Banzhaf, W. : On evolutionary design, embodiment, and artificial regulatory networks. In: Iida, F. , Pfeifer, R. , Steels, L. , Kuniyoshi, Y. (eds.) *Embodied Artificial Intelligence. LNCS (LNAI)*, vol. 3139, pp. 284 – 292. Springer, Heidelberg (2004)
- [15] Kernbach, S. : From robot swarm to artificial organisms: Self-organization of structures, adaptivity and self-development. In: Levi, P. , Kernbach, S. (eds.) *Symbiotic Multi-Robot Organisms: Reliability, Adaptability, Evolution*, pp. 5 – 25. Springer, Heidelberg (2010)
- [16] Kernbach, S. : Heterogeneous self-assembling based on constraint satisfaction problem. In: Martinoli, A. , Mondada, F. (eds.) *10th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems. Springer Tracts in Advanced Robotics*. Springer, Heidelberg (2011)
- [17] Salemi, B. , Shen, W. – M. : Distributed behavior collaboration for self-reconfigurable robots. In: *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA – 2004)*, New Orleans, USA, pp. 4178 – 4183 (2004)
- [18] Lau, H. Y. K. , Ko, A. W. Y. , Lau, T. L. : The design of a representation and analysis method for modular self-reconfigurable robots. *Robot. Comput. – Integr. Manuf.*

- 24 (2), 258 – 269 (2008)
- [19] Castano, A. , Will, P. : Representing and discovering the configuration of CONRO robots. In: Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA – 2001), vol. 4, pp. 3503 – 3509. IEEE, Los Alamitos (2001)
- [20] Burkard, R. , Dell’Amico, M. , Martello, S. (eds.): Assignment Problems. Society for Industrial and Applied Mathematics (2009)
- [21] Kernbach, S. , Meister, E. , Scholz, O. , Humza, R. , Liedke, J. , Ricotti, L. , Jemai, J. , Havlik, J. , Liu, W. : Evolutionary robotics: The next-generation-platform for on-line and on-board artificial evolution. In: Tyrrell, A. (ed.) Proc. of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE CEC – 2009). IEEE Press, Trondheim (2009)
- [22] Loiola, E. , de Abreu, N. M. , Boaventura-Netto, P. , Hahn, P. , Querido, T. : A survey for the quadratic assignment problem. European Journal of Operational Research 176 (2), 657 – 690 (2007)
- [23] Kornienko, S. , Kornienko, O. , Priesse, J. : Application of multi-agent planning to the assignment problem. Computers in Industry 54 (3), 273 – 290 (2004)
- [24] Kernbach, S. , Meister, E. , Schlachter, F. , Kernbach, O. : Adaptation and self-adaptation of developmental multi-robot systems. International Journal On Advances in Intelligent Systems 3 (1, 2), 121 – 140 (2010)

第七章 模块化机器人的形态自重构

Yan Meng, Yaochu Jin

Yan Meng, 斯蒂文斯理工学院电子和计算机工程系, 美国, 霍博肯, NJ 07030, e-mail: yan.meng@stevens.edu

Yaochu Jin, 萨里大学计算机系, 英国, 萨里, 吉尔福德, GU2 7XH, e-mail: yaochu.jin@surrey.ac.uk

摘要: 将模块化机器人自重构为不同的形态以适应动态环境, 至今仍然是一个具有挑战性的问题。为了解决这一问题, 本章中提出了一种由生物形态启发而来的新的计算框架。我们首先引入两个可重构模块化机器人, Cross-Cube 和 Cross-Ball, 它们是针对多种复杂的重构形式, 使用提前位姿形态方法而开发的。然后, 针对 Cross-Cube 和 Cross-Ball 两种机器人提出了一种分层的形态自重构模型。在该分层模型中, 层 1 的控制器负责自适应构型生成, 该生成是基于当前的环境约束和有关的任务需求。层 2 控制器通过自动生成目标构型来导引模块汇聚为目标形态。层 1 和层 2 控制器都是一般的控制器, 理论上它们可应用于其他可重构模块化机器人中。层 3 是基于硬件的控制器, 它主要处理模块移动时的物理约束。这种分层的形态模型以分布式方式作用于可重构模块化机器人的每一个模块上, 而且其中每一个模块只是基于其局部的传感信息进行配置运动, 并与其局部邻近的模块分享信息。大量的仿真结果已经证实了所提出的模型设计和为 Cross-Cube 和 Cross-Ball 两种模块化机器人提出的相应的分层形态模型在构建多种形态中的可行性和效率。

1 介绍

可重构模块化 (RM) 机器人是一种具有可变形态的模块化机器人, 它们能够通过重新组织模块的连接性来故意改变其自身的形状以适应新的环境, 执行新的任务或者从毁坏状态中恢复。每一个模块都是一个独立的

单元,能够连接至其他单元,或者断开与其他单元的连接来动态地形成各种各样的结构或形式。与传统的机器人系统不同, RM 机器人在稳健性和对动态环境的适应性上更具潜力。

通常, RM 机器人的机械设计可分为基于链的和基于网格的机器人。基于链的 RM 机器人^{11,34,29,26}由模块组成,这些模块由串行链连接以形成线、树或者环结构,从而可以进行缩放并容易进行运动规划。但是,基于链的 RM 机器人很难进行任意复杂 3D 构型的搭建。为了解决这一问题,人们提出了基于网格的 RM 机器人^{32,3,37,8},其中将模块排列在空间中离散的网格内,并能够建立复杂的 3D 构型。从而导致对基于网格的 RM 机器人的控制和运动规划变得更加复杂。此外,还通过组合两种类型 RM 机器人的优点开发了一些混合 RM 机器人,比如 ATRON¹³、M-TRAN II¹⁴、M-TRAN III¹⁵以及 SUPERBOT²⁵,它们旨在提供更加复杂且灵活的形式。然而,由于硬件模块的机械约束,对绝大多数可用的 RM 机器人来说,很难建立任意复杂的构型。

自组织和自修复对于 RM 机器人的成功非常重要,通常,为了运动、操作的目的,或者为了创建稳定的静态结构,需要进行重构。RM 机器人的自组织尤其具有挑战性,因为它包括协调有可能是大量模块的运动,并同时执行由它们物理设计所施加的运动约束。人们已经为多种 RM 机器人提出了几种重构机制^{23,35,36,6},但使用集中方法进行预定义构型的 RM 机器人非常容易发生系统失效或故障,并不能扩展为更加复杂且大规模的系统。为了解决这一问题,人们又提出了一些集中方法^{20,24,12,31},使 RM 机器人中的每一个模块决定其自身的运动,而不受中心控制器的控制。为了进一步改进自组织能力,一些研究者将注意力转向生物系统,以期带来启示。Fukuda 等人⁷基于细胞结构,首先为一种分布式 CEBOT(细胞结构机器人)系统的、基于静止和移动的机械手提出了一种优化结构决策方法。Shen 等人²⁸提出了一种受激素启发的自适应通信协议和自适应分布式控制协议,从而使得模块能够使用类似激素的信息来实现运动和自重构。文献[27]中为机器人组织的自重构提出了一种人工平衡的激素系统,其中将相关的动力系统参数化并编码在组织的“基因组”中,该组织通过进化算法进行选择。文献[30]中为一个模块化机器人开发了一种元胞自动机方法。

然而,这些方法中的绝大多数需要一些预定义的规则,来重新配置为有限的一组预定义模式。据我们所知,当前很少有 RM 机器人能够基于它们的在线传感信息自动重新组织它们的结构来适应不同的环境。尽管自组

织被认为是 RM 机器人的最重要的特性,但是自动调整它们的构型以适应环境剧烈变化的能力仍有待论证。为了解决这一问题,我们开始研究多细胞生物中的形态发生过程。形态发生是使得组织发育为其形状的生物过程,在形态发生过程中,每一个系统中的基因被表达,从而导致多种细胞功能。基因自身的蛋白质产物以及同一细胞或者相邻细胞中其他基因的蛋白质产物,通过细胞内和细胞间的扩散来调控基因的表达,从而形成一种复杂的基因调控网络 (GRN),该相关 GRN 在组织形态发生过程中起到重要的作用。

RM 机器人与多细胞组织之间具有直接的联系, RM 机器人中的每一个单元可看作是一个细胞,而且多细胞组织中的细胞和 RM 机器人中的模块间在控制、通信和物理相互作用上具有相似性。例如: RM 机器人和多细胞组织中的控制都是分散的。此外, RM 机器人和多细胞组织的全局行为都是通过单元的局部相互作用来显现,这包括 RM 机器人中的机械、磁学和电学机制,以及多细胞组织中的化学扩散和诸如黏着之类的细胞物理相互作用。

所以,受到多细胞组织胚胎发育的启发^[33],本章中应用相关的生物形态形成原理,提出了两种 RM 机器人的形态自重构,这两种机器人为 Cross-Cube^[16,17] 和 Cross-Ball^[18]。Cross-Cube 和 Cross-Ball 两种 RM 机器人的机械设计都属于混合 RM 机器人,它组合了基于链的和基于网格的 RM 机器人的特点。并且为 Cross-Cube 和 Cross-Ball 两种 RM 机器人的自重构提出了一种分层形态模型。一般来说,层 1 控制器为构型生成层,其主旨是为 RM 机器人生成合适的构型以适应当前环境和有关的任务。层 2 控制器是一个基于基因调控网络 (GRN) 的控制器,它为模块自动产生自重构规划,以将模块汇聚为由层 1 生成的目标构型。由于 Cross-Cube 中模块移动的高度灵活性,这一两层模型对于 Cross-Cube RM 机器人已经足够,但 Cross-Cube 机器人的机械和电子设计都非常复杂,很难在物理原型中执行。所以,改进了 Cross-Cube 机器人的设计,开发了一种新的 RM 机器人,称为 Cross-Ball 机器人。与 Cross-Cube 机器人相比, Cross-Ball 机器人的机械和电子设计复杂性显著降低,但代价是失去了 Cross-Cube 机器人一些模块的移动灵活性。因此,需要为 Cross-Ball 机器人附加层 3 控制器,以处理模块移动的物理约束。

所提出的 RM 机器人的形态自重构有如下几点主要贡献:

(1) 由于 Cross-Cube 和 Cross-Ball 两种 RM 机器人中模块移动的高度复杂性,使用这两种 RM 机器人能够构建多种复杂的构型。

(2) 有了所提出的分层形态模型,两种 RM 机器人都能够根据它们的机载传感信息自动地自重构它们的模型为合适的构型以适应动态环境。到目前为止,现有的 RM 机器人很少具备这种自重构能力。

(3) 所提出的分层形态模型在两种 RM 机器人的每一个模块上以分布式方式进行执行,其中每一个模块基于其局部感知自己做出决定,这些感知依靠其自身及其直接临近的模块获得。利用这种方式,两种机器人对于系统失效和系统故障都非常稳健,并能够自动地进行自修复。本章的下面几节是这样组织的:首先,第2节简要介绍多细胞形态生成;在第3节中介绍一般的分层形态模型;第4节和第5节分别描述 Cross-Cube 和 Cross-Ball 两种 RM 机器人的硬件设计和相应的分层形态模型以及每一个 RM 机器人的实验结果;在第6节中给出结论和未来的工作。

2 多细胞形态形成

形态形成是发育生物学中的一个基本生物学过程,它引导生物体发育为机体。多细胞形态形成受基因调控网络 (GRN) 的控制。当表达一个基因时,存储在染色体中的信息被转录到 mRNA 中,然后翻译为蛋白质,其中的一些蛋白质成为转录因子,这些转录因子能够调控它们自身的基因或其他基因的表达,从而形成一个复杂的相互作用基因网络,称为 GRN。为了更好地理解由于调控网络中基因的相互作用而引起的自然发生的形态,在系统生物学中,人们热衷于使用一种计算模型来认识基因调控路径^[1]。人们已经提出了大量的 GRNs 的计算模型^[5,4],它们可大体上分为离散模型,比如随机布尔网络和马尔可夫 (Markovian) 模型,以及连续模型,比如普通的差分方程和偏微分方程。有时候根据 GRN 在描述基因表达中随机性的能力,它们同样被区分为确定性模型和随机模型。

3 一种通用的分层形态模型

受到生物形态形成机制的启发,人们提出了一种通用的分层形态模型,在原理上它可以应用于动态环境中多种 RM 机器人的自重构。首先, RM 机器人需要形成的目标形态能够基于当前环境和任务需求而自动生成,这也是分层模型中的层1控制器。其次,需要层2控制器自动生成自重构规划来导引 RM 机器人中的每一个模块汇聚为由层1控制器生成的目标形态。接着,基于不同的机械设计约束和 RM 机器人模块移动的物理约束,

需要不同的移动控制方法来将模块移动至它们在目标构型中的目标位置，该过程遵循由层2控制器提供的自重构规划。图1给出了该分层形态模型的框图。由于模块不同的硬件设计和物理约束，需要使用不同的RM机器人来为每一层开发不同的分层控制器，但它们都具有如图1所示的基本控制结构。

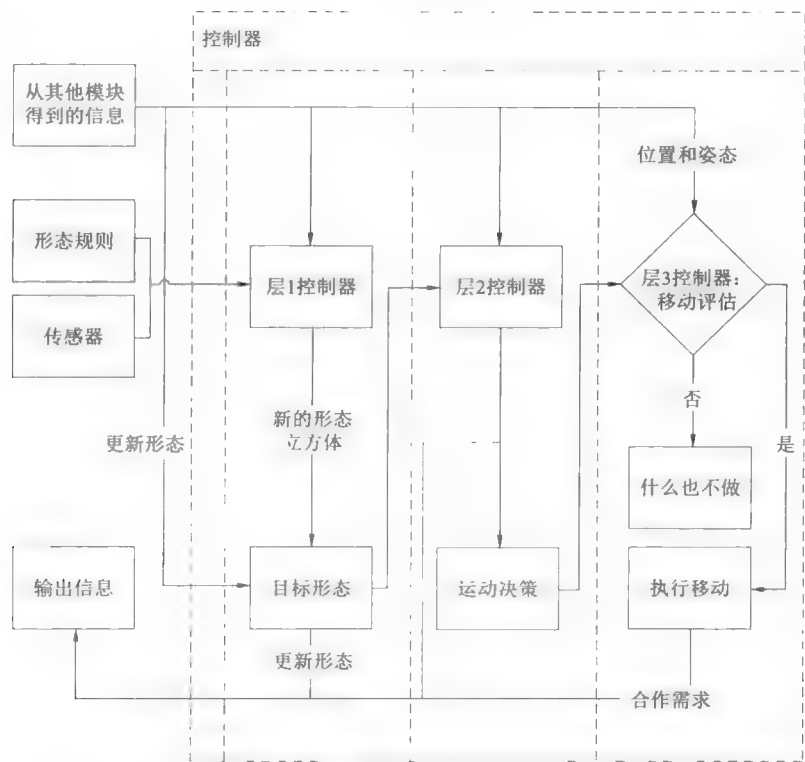


图1 为RM机器人中每一个模块提出的分层形态控制器的框图

4 Cross-Cube RM 机器人的自重构

4.1 Cross-Cube 机器人的硬件设计

Cross-Cube 是我们在机器人模拟器中开发的一种 RM 机器人，该模拟器使用一个实时物理引擎 PhysX^[16]。Cross-Cube 机器人中的每一个模块都是一个立方结构，它们具有其自身的计算和通信资源以及制动能力。每一个模块能够觉察到其局部环境，并能够使用机载传感器与其临近模块进行

通信。而且每一个 Cross-Cube 模块都是由一个核和一个壳组成,如图 2 所示。其中核是一个具有六个万向节的立方体,它们的默认前进方向分别有底、顶、右、左、前和后。模块的每一个关节能够连接到或脱离其相邻模块的关节,且每一个关节的轴都能够灵活地旋转、伸长,以及回到它们的默认方向。基本的模块运动包括旋转、攀爬和并行移动,图 2 展示了两模块的旋转运动。并行运动的意思是一个模块移动至的下一个位置与其当前位置平行,而攀爬运动的意思是一个模块移动至一条对角线的相邻位置。Cross-Cube 的详细机械设计及其运动能力参见文献 [16]。

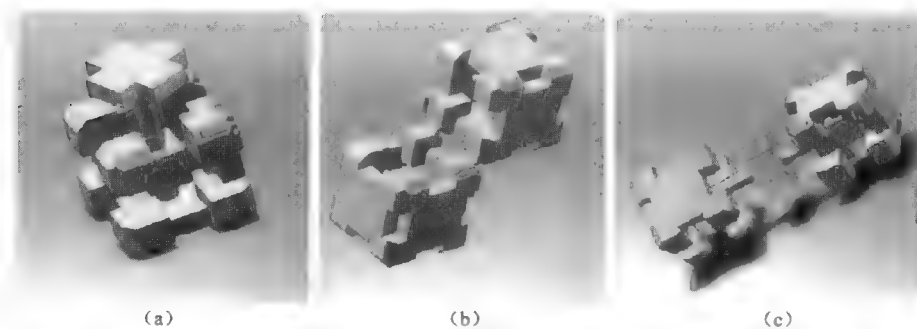


图 2 Cross-Cube 模块的机械展示。图 (a) 所示为关节;图 (b) 所示为位于模块边界上的闭锁;图 (c) 所示为模块关节的旋转和伸长

4.2 一种混合分层模型

基于如图 1 所描述的通用分层形态模型,我们在先前的工作^[16]中为 Cross-Cube RM 机器人提出了一种混合分层模型,其中层 1 控制器是一种以规则为基础的方法,它用来产生目标形态,其中的规则根据查找法来描述。层 2 控制器为一个基于 GRN 的控制器,它用来自动将模块重新配置为目标形态。由于 Cross-Cube 模块的模块运动中没有物理约束,所以对于 Cross-Cube RM 机器人而言,它不需要特定的运动控制器,因此,这里我们只关注前两层的控制器。

4.2.1 层 1 控制器的以规则为基础的方法

起初,对于给定的任务,可将适应不同环境的大量基本构型表示在一个查找列表中,表 1 列出了使用列表法的汽车构型的定义。在表 1 中, x , y 和 z 为网格位置的 3D 坐标, MG 表示成形素值, PID 代表位置识别,目标形态由网格位置上的成形素值定义。

表 1 汽车构型的定义

位置 (x, y, z, MG, PID)		关节 (PID1, PID2, RD)
(0, 0, 0, 10, 0)	(1, 0, 3, 10, 10)	(0, 1, 0)
(1, 0, 0, 10, 1)	(2, 0, 3, 10, 11)	(2, 3, 1)
(2, 0, 0, 10, 2)	(0, 0, 4, 10, 12)	(6, 7, 0)
(3, 0, 0, 10, 3)	(1, 0, 4, 10, 13)	(8, 9, 1)
(1, 0, 1, 10, 4)	(2, 0, 4, 10, 14)	(12, 13, 0)
(2, 0, 1, 10, 5)	(3, 0, 4, 10, 15)	(14, 15, 1)
(0, 0, 2, 10, 6)	(0, 0, 1, -1, 16)	
(1, 0, 2, 10, 7)	(3, 0, 1, -1, 17)	
(2, 0, 2, 10, 8)	(0, 0, 3, -1, 18)	
(3, 0, 2, 10, 9)	(3, 0, 3, -1, 19)	

对环境变化的适应性是 RM 机器人的最重要的特性，所以需要定义一种机制，根据局部传感器反馈来适应性地修改 RM 机器人的目标构型，以便对环境变化做出响应。对于这一任务，首先假设每一个模块上都安装有一个传感器来探测模块与环境中障碍物之间的距离，模块一旦接收到这种传感器反馈，这一传感信息会通过局部通信传递至其临近模块，用这种方式可实现形态的全局变化。所以，我们开发了一种以规则为基础的控制器的来解决这一适应性问题。假设起初所有机器人模块都知道汽车构型的前进方向，当一个机器人需要穿过一个路径，而该路径的宽度又小于机器人的宽度时，机器人的前排模块的宽度将首先调整以适应路径的宽度，汽车的其他排通过模块间的本地通信，将以分散的方式一排接一排地调整，该过程中的基本规则总结如下：

- 规则 1：一旦有前排中的一个模块探测到障碍物，该模块就会通过本地通信将该信息传递至其临近模块，直到所有模块重置为“不稳定”状态以便初始化。参见下一子节中模块的有限状态机。
- 规则 2：如果第一排中某些模块探测到障碍物，它们将做出机器人是否需要重构以避免障碍物的决定。如果是，这些模块将估算需要去掉多少个模块并通过本地通信将这一信息传递至同一排中的其他模块。因此，就将这些需要去掉模块的位置上的成形素值置为负，而将其他位置上的成形素值置为正。
- 规则 3：在基于 GRN 的形态成形控制器（将在下面介绍）完成一排中模块的识别后，这些模块的状态将置为“稳定”。

• 规则 4：如果汽车形态的一排已经完全置为稳定模块，那么这些模块会将汽车形态下一排位置处的成形素值置为正。

• 规则 5：当所有的模块都变为“稳定”状态时，形态形成过程将终止。

这种以规则为基础的方法使得模块化机器人能够调整其构型，以适应当前的环境约束。

4.2.2 层 2 控制器的基于 GRN 方法

一旦目标形态在查找列表中进行了初始化，并根据上述以规则为基础的方法调整其不同形态以对环境变化做出响应，那么下一步就是配置 Cross-Cube 模块使它们汇聚于目标构型。通过将任意一个模块设置为原点，所有其他模块就能够通过本地通信很容易地判断出它们与原点间的相对位置。基于这种相对位置以及目标形态的信息，每一个模块就能够产生不同种类的蛋白质吸引其他模块来填充那些具有正成形素值的相邻位置，或者将那些具有负成形素值的位置上的模块排斥出去。

模块的有限状态机。一个 Cross-Cube 模块的有限状态机如图 3 所示，其中每一个模块具有五种不同的状态，即“稳定”“不稳定”“正在吸引”“正在排斥”和“已排斥”。“稳定”状态为模块的最终状态，“正在吸引”状态，意思是模块正在吸引其他模块填充其一些相邻的网格；“正在排斥”状态，意思是模块正在将不需要的相邻模块排斥出去；“已排斥”状态，意思是模块对排斥请求做出响应并离开当前网格。

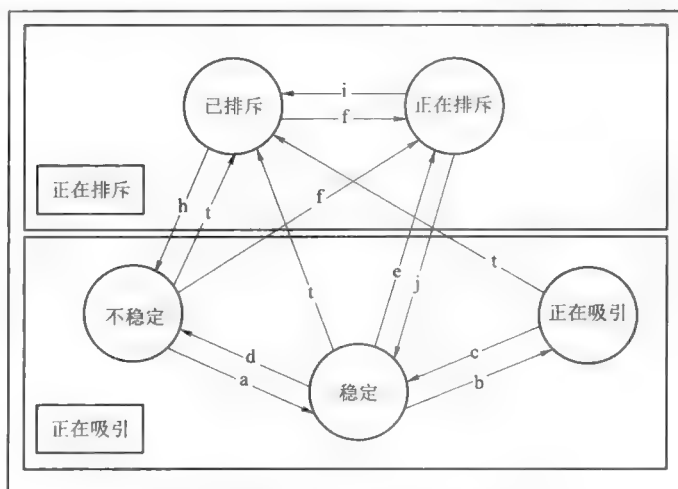


图 3 Cross-Cube 模块的有限状态机

当一个“不稳定”的模块到达目标网格时，它会将其状态变为“稳定”（箭头 a）。而当一个“稳定”的模块有相邻网格需要填充时，它就将其状态变为“正在吸引”（箭头 b）以吸引那些“不稳定”的模块来填充这些网格。那些相邻网格一旦全部被占据，“正在吸引”模块就会回到其“稳定”状态（箭头 c）。一个“稳定”的模块也可以通过将其状态变为“不稳定”（箭头 d）拒绝其当前位置，以填充形态中那些具有较高成形素值的网格。

“正在排斥”模块通过将它们的状态设置为“已排斥”（箭头 t）来将那些不需要的相邻模块排斥出当前位置；此后那些“已排斥”模块移出当前位置，并将其状态切换为“不稳定”（箭头 h）。在两种情况下，一个模块能够触发至“正在排斥”状态：第一种情况是，当一个“稳定”模块发现其一些相邻模块需要被去除（具有负的成形素值），该模块就会改变其状态为“正在排斥”（箭头 e），并将那些相邻模块的状态切换为“已排斥”（箭头 t）。当所有的“已排斥”模块全部离开时，“正在排斥”模块的状态则回到“稳定”（箭头 j）。第二种情况是，当发生僵局时，其中一个正在移动的模块受到其相邻模块的阻碍。为了消除这种僵局，受阻的模块将其状态切换为“正在排斥”（箭头 f），并尝试将其所有相邻模块的状态变为“已排斥”（箭头 t）。这样就移开了其一些相邻的模块，并为受阻的模块腾出空间便于其通过。此后“正在排斥”模块回到“已排斥”状态（箭头 i）。为了避免僵局的发生，通常排斥状态比吸引状态具有更高的优先级。

每一个模块的状态转换都受到 GRN 模型的控制，它具有两个基因 - 蛋白对：一个吸引的基因 - 蛋白对（ g_A, p_A ）和一个排斥的基因 - 蛋白对（ g_P, p_P ）：

（1）用于吸引的基因 - 蛋白对。吸引的基因 - 蛋白对（ g_A, p_A ）用于控制图 3 中“正在吸引”“稳定”和“不稳定”三种状态间的转换，其控制过程则是基于由层 1 生成的目标形态的成形素值。初始时，将所有模块的状态设置为“不稳定”。当对它们使用目标形态和与原点间的相对位置信息进行初始化后，那些位于具有正成形素值网格上的模块的状态将变为“稳定”，一个“稳定”模块会将其吸引基因 g_A 的基因表达水平初始化为零。

基本地，基因 g_A 的表达水平对模块状态的影响如下：

$$\text{状态} = \begin{cases} \text{“不稳定”}, g_A < G_{A,L} \\ \text{“稳定”}, G_{A,L} < g_A < G_{A,H} \\ \text{“吸引”}, g_A > G_{A,H} \end{cases} \quad (1)$$

其中 G_{A_L} 为一个负的阈值, 而 G_{A_H} 为一个正的阈值。

每一个“稳定”模块都会为所有那些具有正成形素值的空相邻网格生成吸引蛋白 p_A , 本地产生的 p_A 和从其他模块接收的 p_A 将会调控基因 g_A 的表达水平。当 g_A 大于 G_{A_H} 时, 状态变为“吸引”, 吸引蛋白 p_A 就会扩散至其他模块。 p_A 定义为:

$$p_A^i = k_1 \cdot mp_j \quad (2)$$

其中 p_A^i 为由模块 i 为其相邻网格 j 生成的吸引蛋白的浓度, k_1 为 p_A^i 在距离上的折率, 实验取 0.8, mp_j 为网格 j 的成形素值。

吸引基因 $g_A(t)$ 的基因表达水平定义为:

$$\frac{dg_A^i(t)}{dt} = -k_2 \cdot g_A^i(t) + k_3 \cdot \sum_j p_A^j - k_4 \cdot \sum_k p_A^{rec} \quad (3)$$

其中 $g_A^i(t)$ 为模块机器人 i 的基因表达水平, 式 (3) 的第一项说明 $g_A^i(t)$ 随时间而衰减。 $\sum_j p_A^j$ 表示由机器人模块 i 为其空的相邻网格产生的所有吸引蛋白的和, 模块为其空相邻网格产生的蛋白越多, 则该模块就具有越高的基因 g_A 表达水平, 这就意味着它具有较高的可能性从“稳定”状态变为“吸引”状态。 $\sum_k p_A^{rec}$ 为由机器人模块 i 从其他模块接收到的蛋白浓度的和。如果有其他模块具有更强的吸引力, 模块会将其状态变为“不稳定”, 从而使 $g_A(t)$ 减小至小于 G_{A_L} 。“不稳定”的模块会选择填充那些所有接收到的吸引蛋白中具有最高 P_A 的吸引网格。 k_2 , k_3 和 k_4 为恒定系数。

(2) 用于排斥的基因-蛋白对。“正在排斥”和“已排斥”状态受到排斥基因-蛋白对 (g_P, p_P) 的控制, “正在排斥”模块产生 p_P 并将其扩散至那些需要排斥的相邻模块。排斥蛋白 p_P 定义为一个正常数, 每一个模块都具有一个基因 g_P , 该基因的表达水平决定了至“已排斥”状态的转换。 g_P 的基因表达水平初始化为零, 并可以通过式 (4) 由 p_P 进行调控。

$$\frac{dg_P^i(t)}{dt} = -k_5 \cdot g_P^i(t) - k_6 \cdot \sum p_P^{rec} \quad (4)$$

$$\text{网格 } i \text{ 的状态} = \text{当 } g_P^i < -mp_i \text{ 时, 被排斥} \quad (5)$$

其中 $g_P^i(t)$ 为在 t 时刻排斥基因的基因表达水平, p_P^{rec} 为所接收到的排斥蛋白的浓度, mp_i 为当前网格的成形素值, k_5 和 k_6 为恒定系数。式 (4) 的第一项表示 $g_P(t)$ 随时间而衰减, $\sum p_P^{rec}$ 表示由模块 i 从其临近模块接收到的所有 p_P 的和, 接收到的 p_P 越多, g_P 越小。式 (4) 表明那些具有较低成形素值的模块更容易被排斥。

4.2.3 实验结果

为了评估所提出的混合方法对于 Cross-Cube RM 机器人自重构的效率和稳健性,我们在机器人模拟器上进行了几种情况下的研究。这种模拟器用于模拟 Cross-Cube RM 机器人的行为及其与物理世界的相互作用,模拟过程使用 C++ 和 nVidia (<http://en.wikipedia.org/wiki/PhysX>) 的 PhysX 引擎。在下面的实验中,系统参数设置为 $k_1 = 0.7$, $k_2 = 1$, $k_3 = 1$, $k_4 = 0.5$, $k_5 = 2$, $G_{A_L} = -1$, $G_{A_H} = 1$, $G_{P_L} = -2$, $C_P^{\tilde{y}} = 0.7$ 。当蛋白质扩散至其相邻模块时,其浓度下降为其原来 80% 的水平。

为了评估基于 GRN 的控制器对于形态形成层的性能,我们首先可以使用如表 1 所示的查表法,来预定义一个固定的目标形态。基于这种预定义的目标形态, Cross-Cube 机器人的模块需要使用基于 GRN 的层 2 控制器自动配置它们自身以形成目标形态,实验中这种形态成形过程的一组快照图在图 4 中给出。从图 4 中我们可以看出, Cross-Cube 机器人能够使用所提出的基于 GRN 的控制器,通过自重构来自动形成一个给定的目标形态。

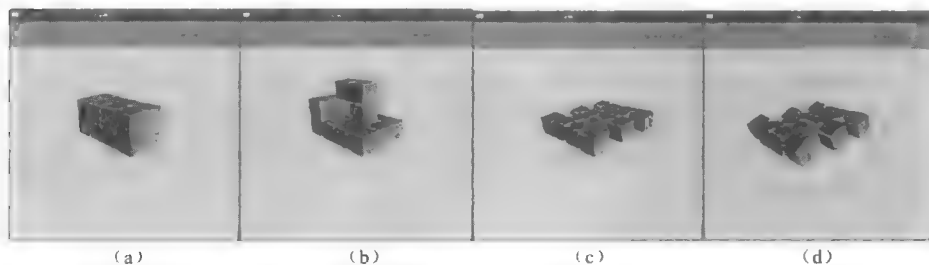


图 4 图 (a)~图 (d) 为 Cross-Cube RM 机器人使用混合分层模型从矩形形态到汽车形态的自主重构

为了评估基于 GRN 的层 2 控制器的自修复性能,这里进行了另一个实验。首先,为机器人预定义一个目标形态(这里为汽车形态)的查找列表。当汽车在运动时,“爆炸”发生并将一些功能模块吹掉,然后有备用模块移动而来填充损坏的模块。图 5 给出在 Cross-Cube 使用所提出的分层框架的自修复过程的快照图。这一实验证实了所提出的方法对于存在一些损坏模块的模块化机器人自修复的有效性。

为了验证以规则为基础的控制器对于形态生成的有效性和稳健性,使用所提出的混合分层模型自动构建一个自适应汽车形态。在形态生成过程中,正的成形素值设置为 10,负的成形素值设置为 -10。如图 6 的一组快照图给出了汽车形态对环境变化的适应性调整过程。首先,形态形成控制

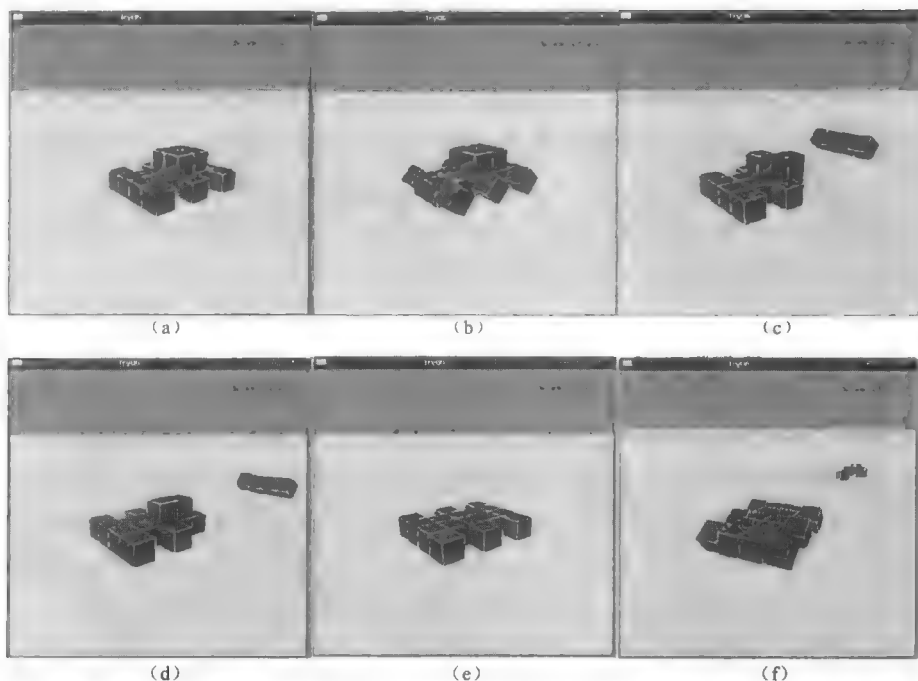


图5 使用基于 GRN 控制器的 Cross-Cube 机器人自修复过程的一组快照图。图 (a) 为汽车形态形成；图 (b) 为汽车模型向前运动；图 (c) 为爆炸发生时一些模块被吹掉；图 (d) 为损害的部分被备用模块填充；图 (e) 为汽车被修复；图 (f) 为修复完成，汽车继续运动

器使用以规则为基础的方法，根据形态需要穿过的路径的宽度产生一个汽车形态。当汽车向前移动时，它会探测到一个更窄的路径，从而产生一个能够适应该较窄路径的新的汽车形态。然后在机器人的前端探测到台阶，则接着动态地生成新的目标形态以使机器人能够攀爬台阶。最后，在完成攀爬后，会再次生成新的汽车形态来继续其运动任务。在该过程中，形态形成层的基于 GRN 的控制器会自动重构模块来形成新的目标形态。

4.2.4 中间总结

在该用于 Cross-Cube RM 机器人自重构的混合分层模型中，层 1 控制器在查找列表中定义了模块化机器人的目标形态，并使用基于规则的方法调整目标形态；而层 2 控制器自动组织模块来实现目标形态。这种混合分层模型的主要局限性在于，必须在查找列表中预先定义目标形态，而第一层的当前设计方法是一种启发式的以规则为基础的方法，它只能生成一些简单的形态，很难针对动态环境生成多种不同的形态。为了解决这一问题，

我们在文献 [17] 中提出了一种新的分层机械化学模型, 将在下面讨论。

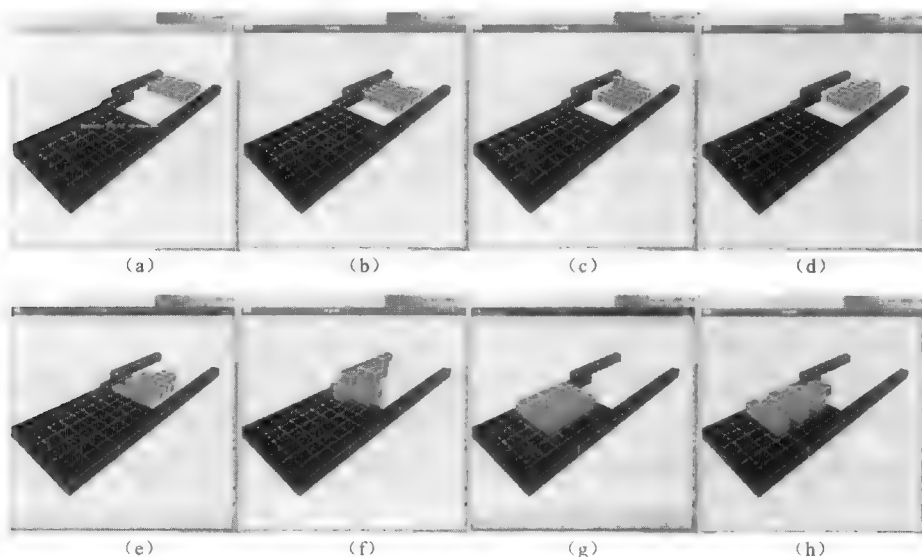


图6 图(a)~图(h)为展示运动和攀爬过程中一系列重构过程的一组快照图。机器人首先调整其宽度以适应较窄的路径, 然后改变其构型以便攀爬台阶, 最后再次重构为汽车形态向前运动

4.3 分层形态模型

4.3.1 层1控制器: 一种机械化学模型

多细胞系统的形态形成提供了一个很好的例子。其中, 通过细胞-细胞和细胞-环境的相互作用实现了自组织形态形成。细胞的环境是一个组成细胞外基质 (ECM) 的非生命物质的复杂混合物^[21,22]。在生物系统中, ECM 为动物组织的细胞外的部分, 动物组织由细胞分泌, 并为细胞提供结构支撑。同时, ECM 的形状同样会由于 ECM 和细胞间的相互作用受到细胞行为的影响, 细胞和 ECM 间的相互作用动力学能够由 Murray 等人^[22]提出的形态形成的机械化学模型描述。在该模型中, 形态形成和形态发生的同步发育是一个闭环系统, 其中的细胞外基质 (ECM) 可以看作是环境约束, 所以非常适合在一个分层形态模型中构建层1。因此, 我们开发了一种基于虚拟细胞 (v-细胞) 的方法来将连续的生物系统转化为离散的机器人系统。这种方法的基本假设列举如下:

- 该模型中有三种基本的组成部分: v-细胞、ECM 和环境 (包括任

务需求和局部环境约束)。在开始时,大量预定义的 v -细胞开始从一个固定的网格增生。 v -细胞能够增生,与其他 v -细胞相互作用,并能够扩散至 3D 空间中。ECM 和环境为 v -细胞的行为提供约束。

- 每一个离散的网格都能够包含 v -细胞。 v -细胞只能移动至那些被模块占据的网格,或者是与模块最邻近的空网格。在这些规则的限制下, v -细胞将不会移动至那些被障碍物占据的网格或者与机器人系统不相连的网格。

- 每一个网格与一个 ECM 值有关,ECM 值由最邻近网格上 v -细胞的密度决定。如果由不同网格上的 v -细胞在同一网格上产生了不止一个 ECM 值,那么最终的 ECM 值为所产生的所有 ECM 值的和。

基于上述假设,我们为模块化机器人的自组织开发了一种新的机械化学模型。如图 7 所示, v -细胞(红色的点)能够在模块化机器人的模块内和它们临近的离散网格内自由移动,而 ECM 和任务需求能够对 v -细胞的行为产生环境约束和任务约束。

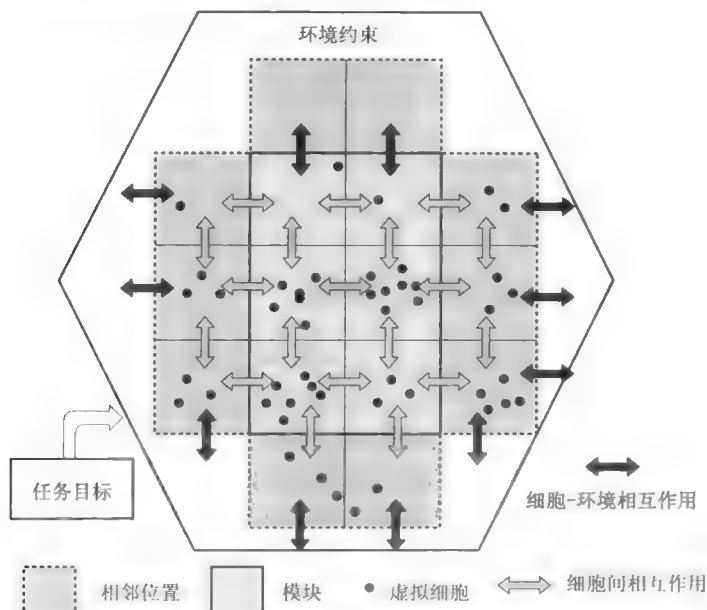


图 7 宏观层面上基于虚拟细胞的机械化学模型(见书后 p. 17 彩图 7)

一个网格中 v -细胞的密度和 ECM 值可以定义为:

$$\frac{dn_i}{dt} = r \cdot n_i (N - n_i) - d \cdot K_i \cdot M_i - a \cdot \frac{\rho_i}{n_i + \rho_i} + \sum_k n_k^{\text{rec}} \quad (6)$$

$$\frac{d\rho_i}{dt} = -b \cdot \frac{n_i}{n_i + \rho_i} + e \cdot \sum_j f_{ji}(n_j) \quad (7)$$

其中 n_i 和 ρ_i 分别表示网格 i 中 v -细胞的密度 ECM 值。式 (6) 的第一项表示 v -细胞的增生速率, 其中 N 为预定义的网格中所能容纳的 v -细胞的最大数量, $(r \cdot N)$ 为网格中 v -细胞的线性增生速率的最大值。当 v -细胞的局部密度较低时, 其增生速率将会加速; 而当该 v -细胞密度接近 N 时, 其增生速率则会降低。

$\mathbf{K}_i \cdot \mathbf{M}_i$ 表示 v -细胞的随机分散, 它依赖于网格 i 的分散控制矢量 \mathbf{K}_i 和一个密度梯度矢量 \mathbf{M}_i 。由于 v -细胞只被允许移动至它们最接近的网格, 所以 v -细胞最多可移动至 6 个方向: 向上、向下、向左、向右、向前和向后。分散控制矢量 \mathbf{K}_i 定义为 $\mathbf{K}_i = [k_i^{\text{up}}, k_i^{\text{down}}, k_i^{\text{left}}, k_i^{\text{right}}, k_i^{\text{forward}}, k_i^{\text{backward}}]$, 其中 \mathbf{K}_i 的每一个元素表示每一个方向上的分散速率。较高的分散速率意味着 v -细胞在该方向上更快地分散。

式 (6) 中的第三项描述在同一网格上 ECM 值如何降低 v -细胞的密度。 $\sum_k n_k^{\text{rec}}$ 表示网格 i 从所有相邻网格接收的 v -细胞的总密度, r , d 和 a 为预定义的常数。

式 (7) 描述了 ECM 值的动力学。式 (7) 的第一项描述了局部 v -细胞的密度如何抑制 ECM 值, v -细胞的密度越大, ECM 值减小的就越多。式 (7) 的第二项表示在网格 i 上如何根据相邻网格上 v -细胞密度的和生成 ECM 值的过程。 $f_{ji}(n_j)$ 为在网格 i 上由网格 j 产生的 ECM 值, 其中 n_j 为网格 j 上 v -细胞的密度。

$f_{ji}(n_j)$ 的详细规则取决于目标形态, 这里我们使用一个类似汽车的形态作为例子来解释如何定义 $f_{ji}(n_j)$, 这一定义将在下面的实验案例研究 1 中应用。我们首先为类汽车形态提出如下设计准则:

(1) 汽车形态的机壳通常设计为一个矩形, 汽车的总宽表示为 $W = x_{\max} - x_{\min} + 1$, 其中 x_{\max} 和 x_{\min} 为汽车形态的最左端和最右端位置。

(2) 在机壳的左边界和右边界处需要设置车轮模块, 但不能非常接近, 否则它们不能自由地旋转。

(3) 应当由低至顶构建目标形态。只有当底层填满, 且仍然有模块剩余时, 顶层才会被填充。

为了使用机械化学模型优化化学形态形成, 使用协方差矩阵自适应进化策略 (CMA-ES)^[10] 来调整模型中的 $f_{ji}(n_j)$ 参数。CMA-ES 是一种随机的迭代优化方法, 属于进化算法的一种。例如: 在类汽车形态中, 要调整的参数有: 汽车的宽度 W 和 ECM_{up} 。根据不同的目标形态来应用不同的 $f_{ji}(n_j)$, 所以, CMA-ES 可调整不同的参数。

最后的目标形态由每一个网格中的成形素值确定。 v -细胞趋向于流向具有较低 ECM 值的网格,因此,网格 i 上的成形素值 mp_i 可定义为每一个网格上 v -细胞的密度和 ECM 值的差 $mp_i = n_i - \rho_i - z_i$, 其中 z_i 为一个阈值,由 $(n_i - \rho_i)$ 决定。因此,所有的具有正成形素值的网格都属于目标形态,而其他的网格则具有负的成形素值。网格上较高的成形素值意味着该网格在被模块填充时具有较高的优先级。当具有正成形素值的网格的数量达到可用机器人模块的数量时,机械化学过程终止。

v -细胞和 ECM 都是虚拟物体,在物理上它们并不存在,它们用存储在每一个模块内存中的变量表示,并能够通过扩散在相邻模块之间交换。对于那些由模块占据的网格, v -细胞的密度和 ECM 值由主模块来估计。而对于那些没有模块存在的空网格, v -细胞的密度和 ECM 值通过相邻模块以分布式方式来维持。值得注意的是,这里只考虑那些与模块紧邻的空网格。

4.3.2 层 2 控制器:一种基于 GRN 的模型

如上所述, RM 机器人的目标形态由与目标形态中网格相关的成形素值定义。为了将模块置于具有正成形素值的网格中,并保持那些具有负成形素值的网格为空,必须要建立局部坐标系,这可以通过将任意一个模块设置为坐标系的原点来实现^[9]。这样,所有其他模块便都能够通过本地通信来确定其相对于原点处模块的位置。在相对位置和目标形态中网格的成形素值的帮助下,每一个模块能够决定:

- (1) 是否要产生吸引蛋白以吸引其他模块来填充其临近网格。
- (2) 是否要产生排斥蛋白来去掉临近模块。
- (3) 模块是否要对其他模块发出的吸引和排斥请求做出响应。所以,模块化机器人的重构是通过改变单个模块的状态来控制的。层 2 控制器的基本模型类似于我们之前讨论的混合控制器中使用的模型,所以跳过这一部分。

4.3.3 实验结果

为了评估所提出的分层形态模型对于 Cross-Cube RM 机器人自重构的效率和稳健性,我们在与前述相同的机器人模拟器上进行了几种情况下的研究。在下面的实验中,分层模型的系统参数设置如下,层 2 中 GRN 模型的参数为: $k_2 = 0.7$, $k_3 = 1$, $k_4 = 1$, $k_5 = 0.5$, $k_6 = 2$, $G_{A_L} = -1$, $G_{A_H} = 1$, $G_{P_L} = -2$ 。层 1 中模型的参数为: $r = 0.005$, $N = 200$, $d = 1$, $a = 0.05$, $b = 20$, $e = 1$ 。对于第 3 种研究情况,应用 CMA-ES 方法来演变机械化学模型中的形态参数,以实现最优的形态形成。

首先, 在一个开放空间中使用所提出的分层形态模型生成汽车形态。 $f(c_i)$ 中的参数定义如下: $x_{\min} = 0$, $x_{\max} = 4$, $ECM_{\text{up}} = 100$, $ECM_{\text{wheel}} = n \times 100$, 其中 n 为在输入位置处 v -细胞的密度。设置形体阈值 Z 为 170。机器人分布在一个 $4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 的矩形区域内。由于在一个开放空间中没有环境约束, 所以将会产生一单层汽车形态, 它与类汽车形态设计的准则相匹配。由左侧和右侧边界的 v -细胞生成的 ECM 值能够被用来生成车轮, 而由一个车轮产生的 ECM 值会减慢 v -细胞至车轮的临近网格的扩散, 从而使得两个车轮模块不会非常接近, 所以车轮可以自由旋转。这一实验的一组快照图, 如图 8 所示。

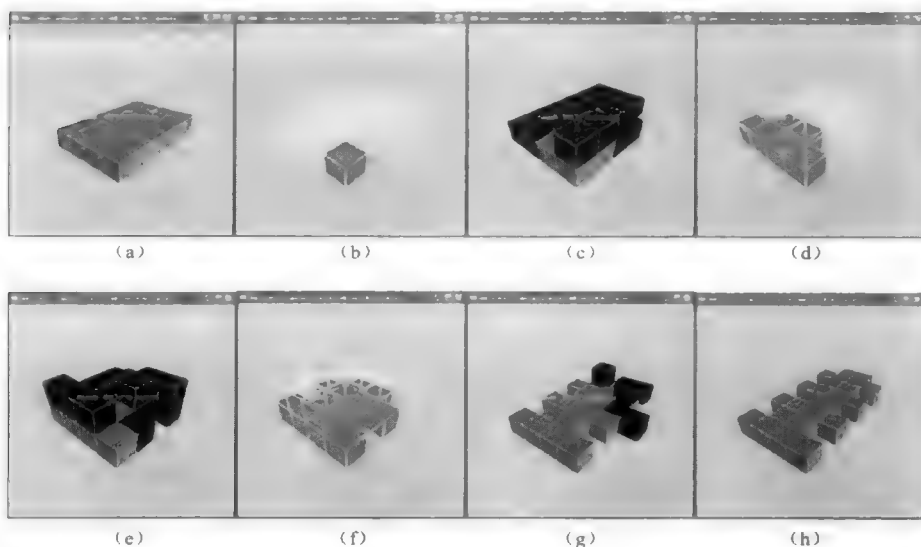


图 8 图 (a) ~ 图 (h) 为在开放空间中模块化机器人的汽车形态生成的一组快照 (见书后 p. 18 彩图 8)

第二种研究情况是证实分层形态模型能否自重构 Cross-Cube RM 机器人使其适应环境变化。更具体地说, 我们想要表明 Cross-Cube RM 机器人能够通过自动改变其形态来攀爬台阶。机器人的起始网格初始化为 4 000 个 v -细胞, 且机器人分布在一个 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的方形区域内。首先, 为了触发机器人向前移动, 在 v -细胞上施加一向前的“力”。而为了更新每一个网格中 v -细胞的密度, 该向前的“力”可以从式 (6) 中的 $\sum_k n_k^{\text{rev}}$ 得到。其次, 我们需要为攀爬形态定义 $f_{\mu}(n_j)$ 。由于我们想要形态能够向前移动并能够攀爬台阶, 所以 v -细胞的扩散方向应当是向前和向上的, 而且要同时保持当前形态的宽度。所以, 如果网格 j 位于形态的最

左端和最右端位置, $f_{ji}(n_j) = 100 \cdot n_j$, 其中 i 为 j 的左侧或右侧网格。再次, 由于机器人必须爬越台阶, v -细胞的上移运动应当鼓励, 而下移运动应当限制。所以将分散控制矢量定义为: $k_i^{up} = 1$, $k_i^{down} = 0$, $k_i^{left} = 0.5$, $k_i^{right} = 0.5$, $k_i^{forward} = 0.7$, $k_i^{backward} = 0.7$ 。

图9中给出了一组表示汽车形态对环境变化的适应性的快照图。其中黑色立方体为“不稳定”的模块。当在机器人前探测到环境中的台阶时, 新的目标形态就会自动形成以使机器人能够攀爬台阶。 v -细胞首先使用层1控制器流向中间网格(还没有到达目标网格), 模块然后在层2模块的控制下移动至某些位置。这两个过程交错发生直到目标形态最终实现, 或者直到机器人成功爬越台阶。

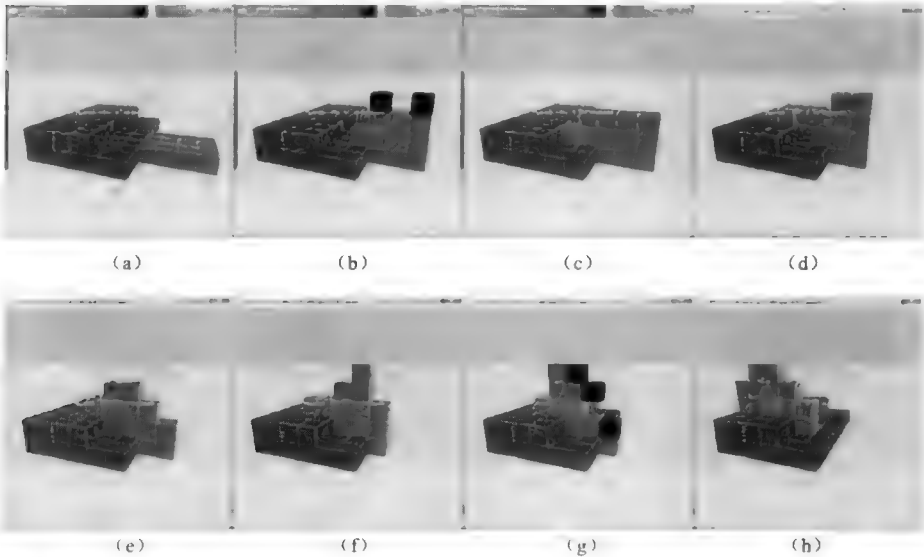


图9 图(a)~图(h)为展示在爬越台阶过程中使用所提出的分层模型自重构过程的快照(见书后p.18彩图9)

第三种研究情况是使 Cross-Cube RM 机器人穿过一个环境。为了优化一个运动任务中模块化机器人的形态设计, 应用 CMA-ES 演化 $f_{ji}(n_j)$ 的形态参数, 其中包括机器人的宽度 W 和 ECM_{up} 。这里对于一种运动形态, 将 CMA-ES 方法的适应度函数定义为某一时间段内的穿越距离, 在某一时间段内机器人能够穿越的距离越长, 当前形态对于该任务的适应度就越高。令 $\lambda = 20$, $\mu = 5$, $\sigma = 50$ 。最优演化的类汽车形态的参数为: $W = 3$, $ECM_{up} = 201$ 。图10给出一组 Cross-Cube RM 机器人对于变化环境自适应过程的快照图, 其中当探测到一个更窄的通道时, 机器人动态地改变其形态。

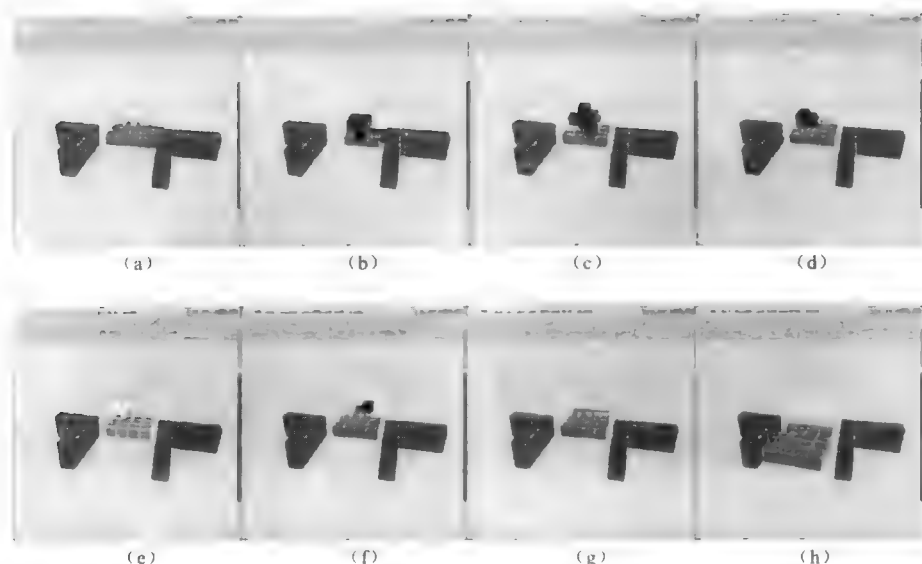


图 10 图 (a) ~ 图 (h) 为展示机器人在变化的环境中运动时的一系列自重构过程的一组快照图。其中机器人调整其宽度以适应较窄的路径 (见书后 p. 19 彩图 10)

4.3.4 中间总结

Cross-Cube 机器人能够提供非常灵活的构型, 然而, Cross-Cube 机器人的机械和电子设计相对复杂, 很难用来搭建物理原型。为了减小 Cross-Cube 机器人的设计复杂性, 并同时保持足够好的灵活性和单个模块的个体机动性, 最近我们改进了 Cross-Cube 机器人的机械和电子设计, 提出了一种新的 RM 机器人, 称为 Cross-Ball¹⁸, 而且同样为 Cross-Ball RM 机器人的自重构开发了相应的分层形态模型, 这将在下面讨论。

5 Cross-Ball RM 机器人的自重构

5.1 Cross-Ball 模块的硬件设计

所提出的 Cross-Ball 模块如图 11 所示, 它是一个直径为 3 in^① 的球体。模块设计为球形, 一方面使得具有较好的个体机动性, 另一方面在自重构过程具有更高的空间效率。该 Cross-Ball 模块具有三个主要组成部分: 一

① 1 in = 2.54 cm.

个位于中间的臂系统和两个位于两侧的半球。两个半球能够根据臂系统进行旋转。在六个正交方向上安装有六个无性连接机构，其详细说明将在后面给出。关于 Cross-Ball 的机械设计和运动能力，详见文献 [18]。

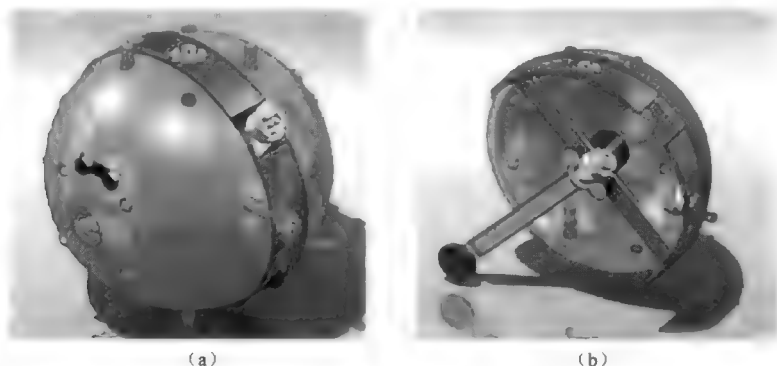


图 11 图 (a) 为所提出的 Cross-Ball 模块 灰色部分为旋转臂系统，它具有主臂和两个扣 在模块的两侧还有两个侧扣；图 (b) 为拥有伸长轮子的半个模块

由于使用了旋转臂和侧扣，模块能够进行三种类型的自重构运动：旋转运动、平行运动和对角线运动。在本文下面的部分中，我们将主要旋转臂称为“线”，这种线具有三种姿态：分别垂直于 x 、 y 和 z 轴。

在旋转运动中，模块能够将其臂与相邻模块的侧扣或臂相连，然后断开所有的静态连接并旋转主臂扣。用这种方法，整个机体就会旋转，因为模块另一侧的臂由相邻的模块固定。对于平行运动，模块移动至其中一个相邻位置，如图 12 (a) 和图 12 (b) 所示。在这种运动中，除移动的模块外，还有其他两个模块包含在内，将它们称为支撑模块。对角线移动意味着模块移动至其对角线方向上的相邻位置上，如图 12 (c) 和图 12 (d) 所示。

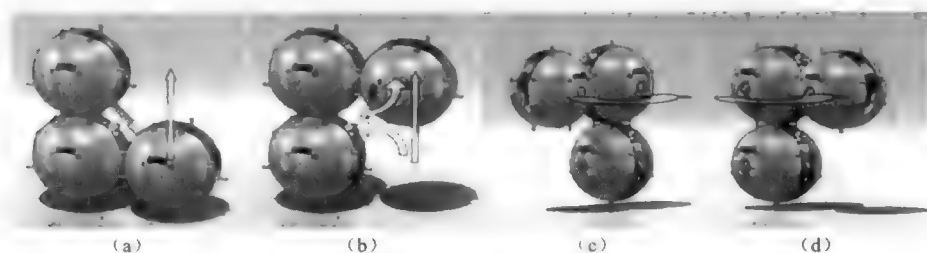


图 12 图 (a) 为平行运动之前的状态；图 (b) 为平行运动之后的状态；图 (c) 为对角线运动之前的状态，目标模块依靠底部模块的臂旋转；图 (d) 为对角线运动之后的状态

基于前面的讨论,如果给定合适的支撑模块,Cross-Ball 模块能够沿任何轴线旋转,移动至其平行位置或移动至其对角线位置。Cross-Ball 模块的自由度(DOF)为6,由于是静态连接,所以模块连接器的维度也为6。当有模块位于球体内时,模块能够占据的立方体空间的数量为1,因为它只能占据一个立方体空间。通常,Cross-Ball 能够提供与 Cross-Cube 可比的重构能力,但它显著减小了设计的复杂性。

5.2 自重构的分层形态模型

与 Cross-Cube RM 机器人相类似,我们对 Cross-Ball RM 机器人也提出了一种分散的分层形态模型,但 Cross-Ball 机器人的分层模型具有三层而不是两层。层1控制器是一个基于构型发生器的形态形成器,它根据当前任务的全局目标和模块的传感器反馈,负责产生合适的目标构型。层2控制器是一个基于 GRN 的自重构规划器,它为单个模块汇聚至目标构型产生运动决策。对于 Cross-Ball 机器人,由于其模块运动的物理约束,还需要层3控制器,它负责模块运动控制。

层1和层2控制器是通用的,在理论上它们可用于任何 RM 机器人,所以,文献[17]中为 Cross-Cube RM 机器人提出的层1控制器和基于 GRN 模块的层2控制器可直接应用于 Cross-Ball RM 机器人的机械化学模型。这里我们只关注 Cross-Cube RM 机器人的层3控制器。

5.3 层3控制器:运动控制器

对于 Cross-Ball 模块,线的配置对于执行旋转、平行运动和对角线运动非常重要。在模块的重构过程中,它们的相对位置同样相应地变化,这会导致接下来的运动由于缺少合适的支撑模块而不能被执行。由于模块的运动约束,很难为一个 RM 机器人开发一种全面的自重构运动控制器。因此,在一些 RM 机器人中引入了基于元模块的方法^[2,19]。在该方法中,由几个 SR 模块将一个元模块编入其中,使得这种模块比单个模块具有更少的运动约束。同时,元模块还增大了 RM 机器人的颗粒度。然而,为了最小化系统的颗粒度并更好地集成层1和层2控制器,我们为层3控制器提出了一种基于骨架的算法来解决机械约束。首先,如果有3个相邻模块能够由模块 S 编入一个元模块,我们就定义模块 S 为一个骨架模块。骨架模块 S 能够自由地配置其自身的线并支撑其他模块的运动。图13给出了元模块的一个例子。

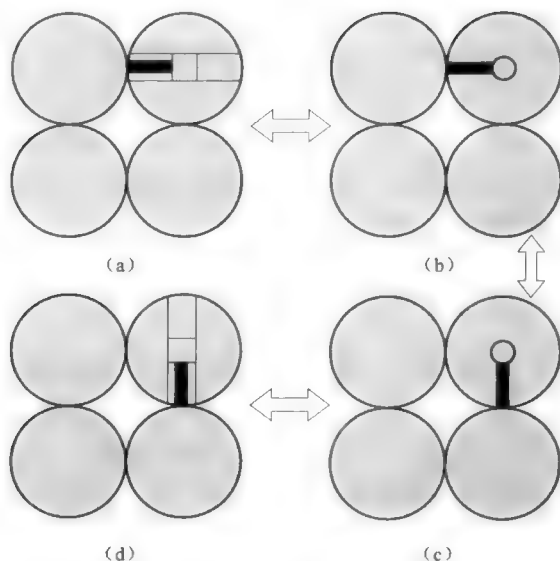


图 13 Cross-Cube RM 机器人的一种元模块。图 (a) 中, 右上侧模块将其主臂与其左侧的模块连接, 并将所有静态连接断开, 且旋转其主臂扣来改变线的姿态; 图 (b) 中, 重新开启静态连接以完成线姿态的调整; 图 (c) 中, 模块将其主臂与下面的模块连接, 断开静态连接, 并旋转主臂扣改变其线姿态; 图 (d) 中, 重新开启静态连接以实现线的调整。所有的过程都可逆, 从而使元模块能够自由地调整线的姿态

层 3 控制器的基本思想是评估由层 2 控制器生成的自重构计划, 并在自重构过程中最大化骨架模块的比例。评价标准包括: A. 如果在当前时刻存在非骨架的“不稳定”模块, 骨架模块将不会运动; B. 如果没有非骨架模块, 则只有那些具有最少相邻模块的骨架模块运动; C. 对于那些非骨架模块和那些将要通过失去相邻模块而转变为非骨架模块的模块, 按照优先级, 它们将——① 将其线与骨架模块连接; ② 将其线与非骨架模块的线连接; ③ 将其线与非骨架模块连接。那些满足所有这些规则的运动将被执行, 否则, 它们将被忽略。如图 14 为层 3 控制器的流程图。

通过引入骨架模块并使得模块能够成组 (骨架模块和非骨架模块) 工作, 模块能够很容易地决定是否要运动、如何选择、如何与支撑模块一起运动。换句话说, 基于骨架的层 3 控制器能够显著地减小模块运动规划中搜索过程的复杂性。从系统级的层面看, 通过引入层 3 控制器, 层 1 和层 2 控制器都能够很好地与 Cross-Ball 定制的硬件设计和相应的运动能力进行集成

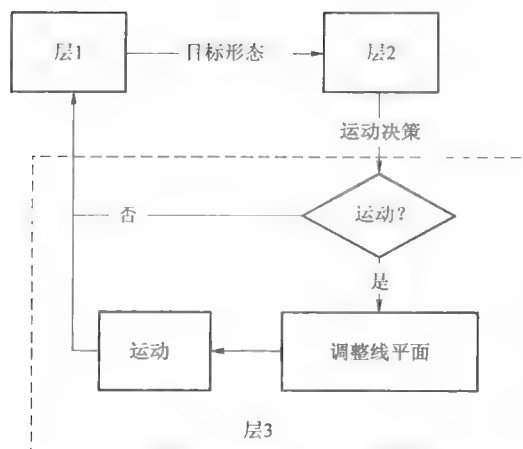


图 14 层 3 运动控制器的流程

5.4 实验结果

为了证实使用三层形态控制器的 Cross-Ball RM 机器人的自重构，我们进行了另一个实验，其中有 27 个 Cross-Ball 模块能够自动地从蛇形形态转变为类人腿的形态，这种重构过程的一些快照图如图 15 (a) ~ 图 15 (d)

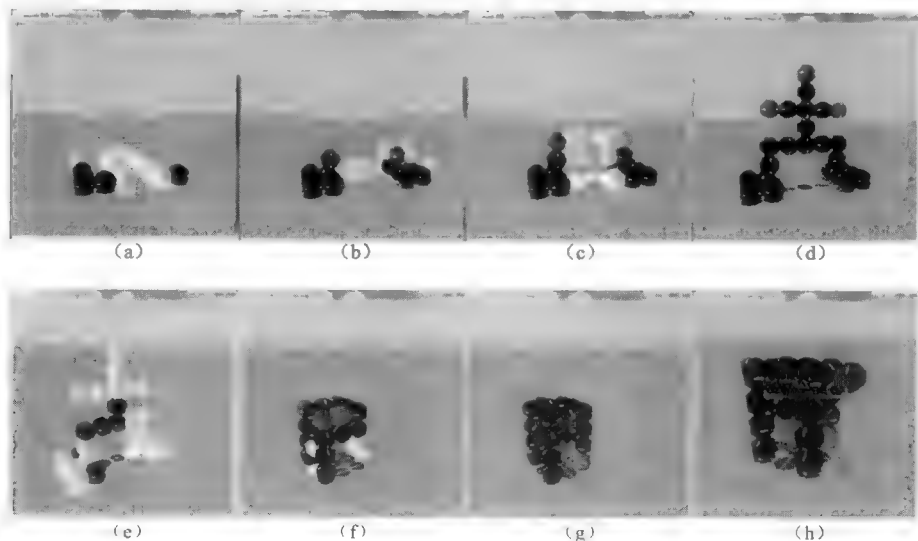


图 15 使用 Cross-Ball 模块和所提出的 3 层分层形态框架的——图 (a) ~ 图 (d) 为从蛇形形态到类人腿形态自重构的快照图；图 (e) ~ 图 (f) 为从类人腿形态到类汽车的 4 腿形态自重构的快照图 (见书后 p. 19 彩图 15)

所示。起初,将类人腿形态中的空间立方体在层1控制器中设置为非ECM立方体;然后将非ECM立方体中的所有模块初始化为500个v-细胞,如图15(a)所示,深色的模块比那些浅色的模块具有更多数量的v-细胞。当系统启动时,v-细胞扩散至非ECM立方体,从而使更多的空间立方体加入到目标形态中,如图15(b)所示。在图15(b)中,一些模块被更多的v-细胞迁移至空间立方体内,所以它们的颜色变得更深。最后,构建类人腿的形态(见图15(c)和图15(d))。接下来,将类人腿的形态重新搭建为一个类汽车的4腿形态,该类汽车形态在其顶部有一些载货空间,类汽车形态中位于其腿末端的模块能够像车轮一样旋转,这一过程的一些快照图如图15(e)~图15(h)所示。从图15中我们可以看出,所提出的3层分层形态框架能够有效地将Cross-Ball RM机器人自重构为多种复杂的形态。

6 结论

在本章中我们介绍了两种新的RM机器人:Cross-Cube和Cross-Ball机器人;并受到多细胞形态形成的启发,为模块化机器人的自重构提出了一种分层形态方法。这一分层结构使得可能将定义目标形态的控制机制与那些实现这种目标形态的机制区别开来,这与生物中的基因调控网络相类似。作为对环境变化的响应,层1能够定义合适的目标构型来适应新的环境,以此为基础,层2为模块生成自重构技术来实现期望的形态。层3则依赖于模块运动的物理约束,致力于处理模块移动的物理约束,从而最终实现目标形态。换言之,层1和层2都是通用的,且在理论上能够应用于多种RM机器人,但层3中的控制器在硬件上是特定的,不同的模块化机器人需要不同的层3控制器。对于具有更多的模块运动的物理约束,层3控制器也会变得更加复杂。

在RM机器人以规则为基础模型中,需要预先定义启发式规则来预测环境中所有可能的情况,这在动态环境中是不可能的,且在适应多种环境变化上不够灵活。相比之下,分层形态模型能够根据从环境中得到的传感器反馈自动地自组织模块,并能够调整其形态以适应环境变化而无须集中控制。

Cross-Cube模块化机器人能够为模块运动提供高度的灵活性而没有模块运动的物理约束,所以,对于Cross-Cube RM机器人的自重构只需要层1和层2控制器。但Cross-Cube机器人的硬件设计较为复杂,很难由物理样

机来执行。通过减小 Cross-Cube 机器人的设计复杂性,我们提出了一种 Cross-Ball RM 机器人,它比 Cross-Cube 机器人具有更简单的硬件设计,但能够为模块运动提供足够的灵活性。为了处理 Cross-Ball 模块中模块运动的物理约束,增加了层 3 控制器。此外, Cross-Ball 模块的独立运动能力不仅能够为自重构提供更多的灵活性,还为其提供了自然集成在群机器人系统中的巨大潜力,其中每一个 Cross-Ball 模块既可用于 RM 机器人中的一个模块,也可以在群机器人系统中作为一个单独的机器人。

当前的分层形态框架中仍然存在一些未解决的问题。第一,需要将层 1 和层 2 控制器简化,以改进自重构的整体控制效率。第二,尽管层 3 控制器以一种分散的方式工作,但它仍然依赖于一些全局信息(模块需要从其他模块收集位置信息),当模块尺寸增加时,这会增加通信和计算成本。第三,尽管当前设计的 Cross-Ball 机器人能够在物化的仿真环境中工作,但我们仍然需要搭建 Cross-Ball 机器人的物理样机,以进一步验证 RM 机器人的设计效率,并评估为其提出的分层形态框架。在未来的工作中,我们将研究这些问题。

致谢

该项目部分受到德国本田研究所欧洲公司的资助(63073),作者还要感谢 Yuyang Zhang 提供了本章中的说明性示例。

参考文献

- [1] Alon, U.: Network motifs: theory and experimental approaches. *Nature Review Genetics* 8, 450–461 (2007)
- [2] Brandt, D., Christensen, D. J.: A new meta-module for controlling large sheets of atron modules. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2375–2380 (2007)
- [3] Butler, Z., Fitch, R., Rus, D.: Distributed control for unit-compressible robots: goal-recognition, locomotion, and splitting. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 7 (4), 418–430 (2002)
- [4] DeJong, H.: Modeling and simulation of genetic regulatory systems: A literature review. *Journal of Computational Biology* 9, 67–103 (2002)
- [5] Endy, D., Brent, R.: Modeling cellular behavior. *Nature* 409, 391–395 (2001)
- [6] Fitch, R., Butler, Z.: Million module march: Scalable locomotion for large selfreconfiguring robots. *The International Journal of Robotics Research* 27 (3–4),

331 – 343 (2008)

- [7] Fukuda, T. , Nakagawa, S. , Kawauchi, Y. , Buss, M. : Self-organizing robots based on cell structures-cebot. In: IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 145 – 150 (1988)
- [8] Gilpin, K. , Kotay, K. , Rus, D. , Vasilescu, I. : Miche: Modular shape formation by self-disassembly. The International Journal of Robotics Research 27, 345 – 372 (2008)
- [9] Guo, H. , Meng, Y. , Jin, Y. : A uniform framework for self-organized multi-robot pattern formation and boundary coverage inspired from morphogenesis. ACM Trans. on Autonomous and Adaptive Systems (2003) (accepted)
- [10] Hansen, N. , Muller, S. D. , Kououtsakos, P. : Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (cma-es). Evolutionary Computation 11, 1 – 18 (2003)
- [11] Hiroshi, U. , Hiroshi, S. , Tetsuji, Y. , Yoshiaki, O. , Saburo, M. , Ryoichi, H. , Jun, M. : Ground testbed of reconfigurable brachiating space robot. Advanced robot 14, 355 – 358 (2000)
- [12] Hou, F. , Shen, W. -M. : Distributed, dynamic, and autonomous reconfiguration planning for chain-type self-reconfigurable robots. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3135 – 3140 (2008)
- [13] Jorgensen, M. W. , Ostergaard, E. H. , Lund, H. H. : Modular atron: modules for a self-reconfigurable robot. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 2068 – 2073 (2004)
- [14] Kamimura, A. , Kurokawa, H. , Yoshida, E. , Tomita, K. , Kokaji, S. , Murata, S. : Distributed adaptive locomotion by a modular robotic system, m-tran ii. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 3, pp. 2370 – 2377 (2004)
- [15] Kurokawa, H. , Tomita, K. , Kamimura, A. , Kokaji, S. , Hasuo, T. , Murata, S. : Distributed self-reconfiguration of m-tran iii modular. The International Journal of Robotics Research 27, 373 – 386 (2008)
- [16] Meng, Y. , Zhang, Y. , Jin, Y. : A morphogenetic approach to self-reconfigurable modular robots using a hybrid hierarchical gene regulatory network. In: 12th International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems, ALIFE XII (2010)
- [17] Meng, Y. , Zhang, Y. , Jin, Y. : Autonomous self-reconfiguration of modular robots by evolving a hierarchical mechanochemical model. IEEE Computational Intelligence Magazine 6 (1), 43 – 54 (2011)
- [18] Meng, Y. , Zhang, Y. , Sampath, A. , Jin, Y. , Sendhoff, B. : Cross-ball: A new morphogenetic self-reconfigurable modular robot. In: IEEE/RSJ International

- Conference on Robotics and Automation (2011)
- [19] Murata, S., Kurokawa, H.: Self-reconfigurable robots. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 14 (1), 71–78 (2007)
 - [20] Murata, S., Yoshida, E., Kamimura, A., Kurokawa, H., Tomita, K., Sokaji, S.: M-tran: Self-reconfigurable modular robotic system. *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 7 (4) (2002)
 - [21] Murray, J. D.: Modelling biological pattern formation in embryology. *ISI Atlas of Science: Animal and Plant Sciences* 1, 270–274 (1988)
 - [22] Murray, J. D., Maini, P. K.: Mechanochemical models for generating biological pattern and form in development. *Physics Reports* 2, 59–84 (1988)
 - [23] Nguyen, A., Guibas, L., Yim, M.: Controlled module density helps reconfiguration planning. In: *Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics* (2000)
 - [24] Rosa, M., Goldstein, S., Lee, P., Campbell, J., Pillai, P.: Scalable shape sculpting via hole motion: Motion planning in lattice-constrained modular robots. In: *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation* (2006)
 - [25] Salemi, B., Moll, M., Shen, W.-M.: Superbot: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3636–3641 (2006)
 - [26] Sastra, J., Chitta, S., Yim, M.: Dynamic rolling for a modular loop robot (2006)
 - [27] Schmickl, T., Hamann, H., Stradner, J., Crailsheim, K.: Hormone-based control for multi-modular robotics. In: Levi, P., Kernbach, S. (eds.) *Symbiotic Multi-Robot Organisms: Reliability, Adaptability, Evolution*. Springer, Heidelberg (2010)
 - [28] Shen, W.-M., Kirivokon, M., Chiu, H., Everist, J., Rubenstein, M., Venkatesh, J.: Multimode locomotion for reconfigurable robots. *Autonomous Robots* 20 (2), 165–177 (2006)
 - [29] Shen, W.-M., Salemi, B., Will, P.: Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for conro self-reconfigurable robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 18 (5), 700–712 (2002)
 - [30] Stoy, K., Nagpal, R.: Self-reconfiguration using directed growth. In: Alami, R., Chatila, R., AsamaLevi, H. (eds.) *Distributed Autonomous Robotic Systems*, vol. 6, pp. 3–12. Springer, Japan (2007)
 - [31] Terada, Y., Murata, S.: Automatic modular assembly system and its distributed control. *The International Journal of Robotics Research* 27 (3–4), 445–462 (2008)
 - [32] Unsal, C., Kiliccote, H., Kholsa, P. K.: A modular self-reconfigurable bipartite robotic system: Implementation and motion planning. *Autonomous Robots* 10, 23–40 (2001)
 - [33] Wolpert, L.: *Principles of Development*. Oxford University Press, Oxford (2002)

- [34] Yim, M. , Duff, D. G. , Roufas, K. D. : Polybot: a modular reconfigurable robot. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp. 514 – 520 (2000)
- [35] Yoshida, E. , Murata, S. , Kamimura, A. , Tomita, K. , Kurokawa, H. , Kokaji, S. : A motion planning method for a self-reconfigurable modular robot. In: Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 590 – 597 (2001)
- [36] Zhang, Y. , Fromeherz, M. , Crawford, L. , Shang, Y. : A general constraint-based control framework with examples in modular self-reconfigurable robots. In: Proc. of IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems (2002)
- [37] Zykov, V. , Mytilinaios, E. , Desnoyer, M. , Lipson, H. : Evolved and designed selfreproducing modular robotics. IEEE Transactions on Robotics 23 (2) , 308 – 319 (2007)

第八章 自组装机器人中的基本问题和 Tribolon 平台上分异的一种案例研究

Shuhei Miyashita, Aubery Marchel Tientcheu Ngouabeu,
Rudolf M. Fuchslin, Kohei Nakajima,
Christof Audretsch, Rolf Pfeifer

苏黎世大学苏黎世人工智能实验室, Andreasstrasse 15, 8050 苏黎世,
e-mail: miya@ifi.uzh.ch

摘要：人类认识到自组装技术是一种制造 3D 微型产品的强有力的方法已经有了相当长的一段时间。在本文中，我们研究了一些关于实现这种小尺寸机器人的主要问题。首先介绍了自组装的概念，并介绍了一些由自然界和人工产品而来的实例。其后研究了自组装中的主要问题，它们可以从多种角度上进行研究，我们将其分为四组：(A) 装配约束问题；(B) 随机运动问题；(C) 物理性质上的相互作用问题；(D) 工程问题。然后我们使用自己开发的平台展示了一种分异效应作为分布式方式实现自组织行为的例子。

1 自组装

生物系统的一个主要特点是分子水平上的活动是以分散的方式实现的，即没有任何中央控制。这种现象的一个方面就是自组装，它被 Whitesides 等人定义为无需人工干预时从部件到形态或者结构的自主组织^[37]（注意自组装的概念不只包括分散功能的情况）。这种组合方法在制造 3D 微型产品上具有很大的潜力，其中拾取与放置类型的制作方法仍然是主要的使用方法。

1.1 自然界中的自组装

自组装的例子在自然界中广泛存在——雪花，其中组分微粒通过吸引

或排斥相互作用力形成有序晶格,在其自发结晶过程中应用了自组装。雪花的常见形状为六角形,但其形态的细节则依赖于环境条件而变化,比如湿度或温度。结晶过程起始于一个“结晶核”——通常是空气中的一粒尘埃——使得其他漂浮的微粒能够与种子连接。微粒一旦与结晶体进行了连接,它们就会改变其自身的外形暴露出其他连接位置,从而得以进一步连接微粒。换句话说,将连接的信息传达至外部微粒。在能量消耗上,该系统为保守系统,也就是说,一个微粒一旦连接至一个簇并改变了其外形,它的能量将继续维持并通过氢键保持其外形,除非温度升高和键被打破。

最近,由于制造小尺寸机器人开始成为一个限制因素,所以这一类自组装开始被人们关注。研究人员认为,将自组装作为一种潜在的工具来实现类生命机器(比如可自修复机器)投向实践听起来似乎合理。然而,尽管在组装超分子和介观结构时具有自然的效率和精度,但人工自组装部件的绝大多数尝试仍然是一个具有挑战性的任务。

1.2 从自组装块到自组装机器人

半个世纪以前,Lionel 和 Roger Penrose 不断地进行了人工自我复制的实验^[27],他们提出了一种在随机环境中进行自然自我复制的力学模型,随后提出了关于无源单元聚类模式的猜测,并将他们的研究集中于形状在模板和组件匹配中的作用^[10],以及它们的时间演化^[18]。Whitesides 研究组也进行了一系列的相关研究,包括:分子模拟化学的位置坐标^[7,6,17,38]、电路功能^[13,5,4]、可逆聚集^[22]、折叠结构^[3]、磁铁的旋转^[16]、转子旋转^[15]。同样地,人们也在形体学上投入了大量的研究努力^[31]。可以用多种方式形成人造化学制品,比如聚合物和二聚体,不过这要依赖于文献[8]中所证实的系统的温度。文献[39]中展示了具有多种尺寸组件的不同聚合模式;文献[34]设计了一种智能自组装块,它能够由单元的旋转角度表示多个状态,该系统能够在一个2D平面上物理地进行XOR计算。

最近,人们对根据随机自组装实现自重构机器人表现出越来越大的兴趣。White 等人研究了两种系统,在这两种系统中,将那些约束了优先级的模型编码入程序中,并由机载微处理器来执行该程序,这样就可以很容易地重构结构^[35]。这些模块起初是没有动力且是被动的,但一旦将它们与具有动力供应的种子模块结合时,它们将变为主动模块。Griffith 等人研究了一种模板复制模块的系统^[14],他们使用同种类型的模块,这些模块可编程且能够存储不同的状态,该系统展示了五个模块的自我复制过程,每一个模块执行一个有限状态机。Klavins 等人研究设计了一种能够使模块组装

为期望产品的语法, 预测这种过程的时间复杂性, 并预测 (并优化) 这种过程的产量²⁰ 等内容。Ishiguro 等人则研究了自然的自我推进机制^[19]。在蚁群启发机器人学中, 人们对自组织的兴趣受到在群落中观察到的相同现象, 尤其是由 *Temnothorax* 发现的育雏分选的激励³⁰。Wilson 等人^[21] 建立了一种算法来实现两种颜色的环形分拣, 其中对不同的目标类型使用了差分回拉距离。通过区分三种类型的冰球, 机器人能够将第一种类型的物体投出与另一个冰球相撞, 在回拉一小段距离后将第二种类型的物体投出, 其后回拉更长的距离后将第三种类型的冰球投出。

2 自组装中的主要问题

本节中我们概括了自组装系统中关于缩放行为基本原理的几个问题。

2.1 正向问题和反向问题

在自组装中, 从一组给定的组件或环境中得到最终的构型称为正向问题²⁶ (见图 1 (a)) (Tetris 被称为 NP-hard 问题¹², 同样需要提及的是, 自组装中的一些情况类似于 Knapsack 问题, Knapsack 问题还被称为 NP-complete 问题)。相反, 为目标构型设计组件的问题则称为反向问题 (见图 1 (b))。在这种“逆向工程”过程中, 设计者必须从最终的结构开始将其拆解, 这一过程也被称为自组装中的一种中心问题。



图 1 图 (a) 为反向问题; 图 (b) 为正向问题

正向和反向问题的一些方面表现出对系统长度尺度的强烈依赖性。预测自组装过程结果的必要前提条件是对组件形态学的详细了解, 组件越大 (这里不仅指形状, 还包括其他形态特征, 比如弹性和自由度), 对其了解也就越容易。与厘米尺寸的组件相比, 分子通常具有较多的自由度, 所以对其形态和组件间的相互作用通常不会了解得足够精确。

从工程的角度或者更高层次上的角度看, 类似的考虑对于反向问题同样存在。假设想要为物体 O 设计一个自组装过程, 有许多种可能性来将大

的 O 分割为组件—— O 越小，就有越多的有关组件的制作约束需要考虑：在分子尺度上，化学合成对能够实现的产物具有很窄的限制。

如图 2 所示，我们认识到，围绕自组装有三个主要问题：即 (A) 组装、(B) 动力学和 (C) 相互作用。每一个问题的解释如下。

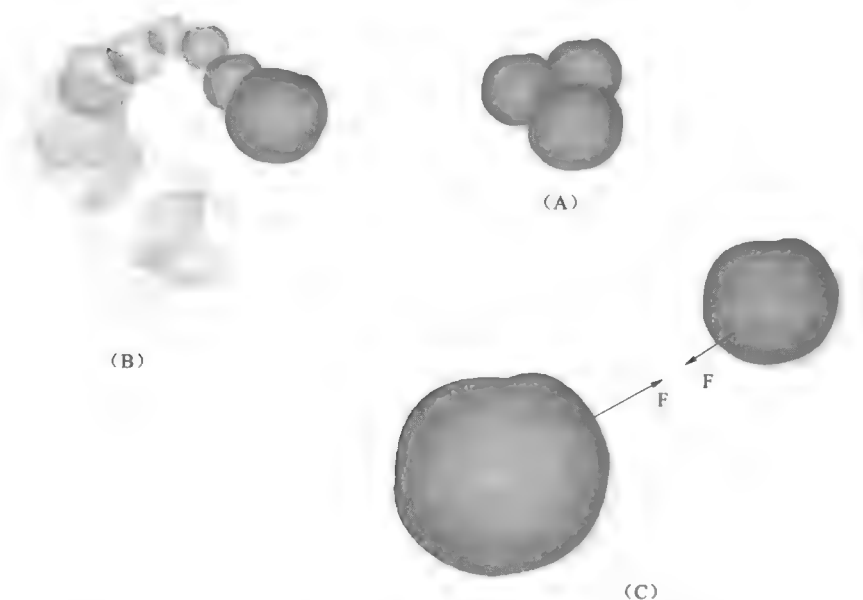


图 2 围绕自组装的三个基本问题。(A) 组装问题；(B) 动力学问题；(C) 相互作用问题（见书后 p. 20 彩图 2）

2.2 (A) 组装

第一个问题是组装过程的特点。

2.2.1 不匹配问题（误差）

在自组装中，当系统通过组件间的相互作用汇聚至一个局部能量最低点时，会导致组装误差（或者错误连接），这主要是由于键合部位较低的编码精度引起的（见图 3）。

解决这种问题主要有两种方法：在调整系统激励水平时增加键匹配的编码精度，以及执行组件的内部状态。对分子生物学的理解提醒我们，丰富的编码能力对于达到足够的键亲和力水平以保持分子键的连接性具有重要作用，它们利用非共价键（氢键、离子键和范德华吸引力）作为相互作用力，并在与其他所选择的分子对接时以某种方式实现某种惊人的特异性

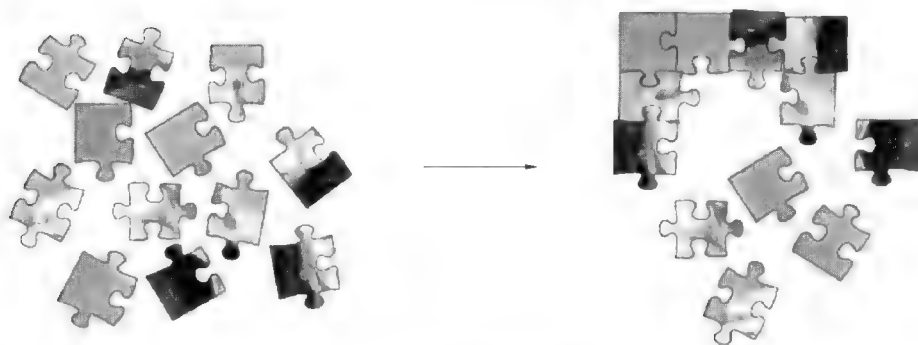


图3 不匹配问题（误差）

（蛋白质在机体周围分配结合位点，以及改变其形态来露出另一个结合位点的技巧，提醒我们内部状态的重要性，这使得组件具有不同的特性）。

从工程的角度看，不匹配问题的缩放行为具有一个有趣的特性，反向问题的相对容易性使人们能够在厘米尺度上构建高度特异且严密的插头－插座型连接位点。

另一方面，分子则具有较好的柔性（具有许多自由度），且受到热运动的扰动，能够以快速的步伐“尝试”它们的配置空间。正因为如此，比如使两个互补的 DNA 链相互接近：如果它们匹配，它们最终将键合在一起。这样一种“快速配置尝试”在大于分子尺度上是不可能实现的，其中一个理由是，机械结构会磨损，而分子不会，分子“关节”能够无限次地进行键合（直到键被破坏之前，在各方面与新形成的键一样好用）。在微米至毫米尺度上，分子键（以及对其相应的认识）已经不再强烈，而这个尺度上的机械插头－插座型连接机构仍然很难制造。

不匹配问题是自然界中的基本问题，DNA 的复制过程受到酶的自修复功能的极大帮助。

2.2.2 拓扑死路问题（空间位阻）

当组件以一种不希望的顺序组装时，这种问题就会发生，由于受到一些早期装配组件的阻碍，使得该问题发生时目标结构不能实现（见图4）。

为了在那些分子机械灵活性不再成为益处的尺度上解决这一问题，组件应当反映其相邻组件的存在——比如作为一种内部状态。而在实际中，内部状态可表达的量由于组件中有限的空间而受到限制，从而导致被其他组件误认的危险。

不管是系统的异构还是同构水平，不可达问题都能够发生。

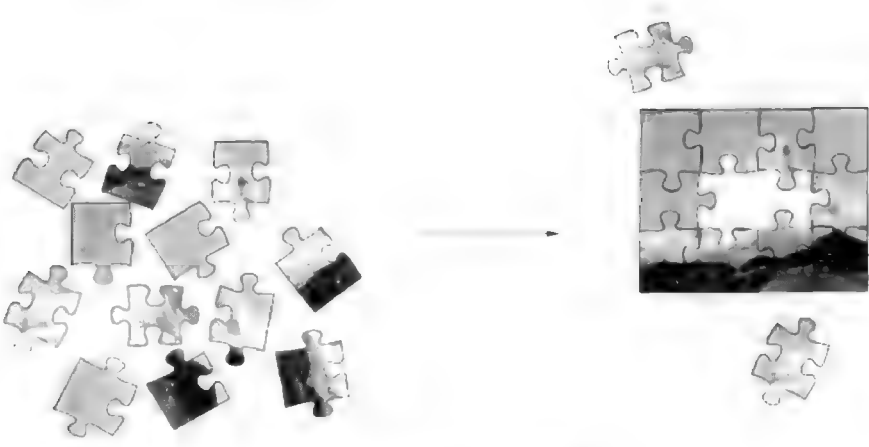


图4 拓扑死路问题（空间位阻）

2.2.3 并行产量问题（残缺问题）

由均相体系生产大量（避免不完整的装配）所需构件的问题，称为并行产量问题，这种问题在本文生物自组装和非生物自组装系统中已经被加以研究¹⁸（Hosokawa 称之为“产量问题”，我们则称之为并行产量问题以示区别）在这里我们所指的问题则是，当组件以正确的方式组装，但由于组合的原因没有完成最终的目标结构时的专门问题（见图5，我们假设扇形组件边靠边地连接）。这是因为许多组装过程以并行的方式进行，早期使用的组件很可能是其他装配过程的反应物，导致补充的成品与先前的反应非常不同。这就意味着许多产品的自组装已经启动但很少能够完成，换句话说，完成所需成品的可能性随着早期和后期反应物比值的上升而下降。

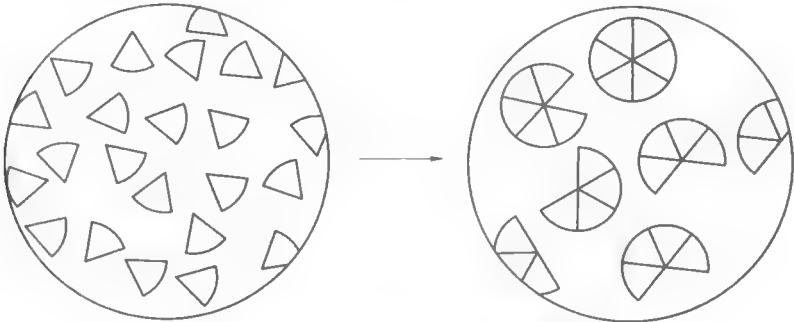


图5 并行产量问题（残缺问题）

所以改进这一问题的一种方法是, 控制系统使后期阶段的反应比早期阶段的反应更有可能发生, 这可以通过在组件内执行其内部状态来处理, 由此导致反应发生时组件具有不同的表现。

另一种方法是增加系统的异构性, 这样极端的情况是, 产品由一组完全不同的组件组成。但异构性带来的某种缺点是, 就像上面所描述的, 它会导致不匹配的高度可能性。

2.3 (B) 动力学

通常认为自组装的范围从分子到宇宙尺寸, 然而, 在我们人类的生活尺度上(从厘米到米)很少有自组装的例子。第二个关注的问题是随机性, 在不同的尺度上它会发生变化。

2.3.1 雷诺数

nm ~ μm 尺度上的生物系统通常会表现出在较大尺度上观察不到的独特行为, 这主要是因为黏度的影响。随着长度尺度的减小, 黏度会逐渐增加, 直到起主宰作用。雷诺数 R 表示黏性力与惯性力的比值^[28]:

$$R = \frac{\text{黏性力}}{\text{惯性力}} \approx \frac{a\eta\rho}{\eta} = \frac{av}{\nu} \quad (1)$$

其中 a 为颗粒的半径; v 为速度; ν 为流体黏度; ρ 为流体密度。水的运动黏度 ν 近似为 $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

对于自组装系统, 1 cm 的尺寸是一个临界尺寸, 对于毫米尺度上水中的物体, 黏性和惯性同样重要(其中的雷诺数为惯性力和黏性力的比值, 约为 1)。因此可以认为, 比该尺寸小的物体更多地受到黏性力的影响, 而那些比该尺寸大的物体则更多地受到惯性力的影响。对于 $1\mu\text{m}$ 或者更小量级上的物体, 比如细菌, 利用环境扩散进行运动比主动推动更加有效(例如: 游动的细菌比扩散的分子更慢^[24])。文献[28]介绍了低雷诺数生命的一些很好的发人深省的建议, 作者叙述了小尺度(μm)生物体比如大肠杆菌通过环境扩散, 而不是通过自我推进来改变它们的位置的有效性。Whitesides 暗示纳米尺度上的力学系统与微米尺度上的力学系统不同, 更多的相关内容详见文献[36]中的生物系统内容。

通过激励输运任何物体一段距离 l 所用的时间约为 l/v , 而通过扩散输运时, 该时间为 l^2/D , 其中 D 为扩散系数, 单位为 cm^2/s ^[28]。也即在微观尺度上,

$$\text{通过激励输运所用的时间: } \frac{l}{v},$$

通过扩散输运所用的时间: $\frac{l^2}{D}$,

它们的比值 (称为激励数 \S) 为

$$\S = \frac{\text{通过激励输运所用时间}}{\text{通过扩散输运所用时间}} = \frac{lv}{D} \approx 10^{-2} \quad (2)$$

该式表示在小尺度上扩散的效率。

2.3.2 Navier-Stokes 方程

不可压缩流动的 Navier-Stokes 方程为:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P + \eta \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3)$$

其中 P 为压力。忽略惯性力项, 考虑较大的 η 值, 式 (3) 可以变换为:

$$\nabla P = \eta \nabla^2 \mathbf{v} \quad (4)$$

这里已知的是, 那些不随时间变化的运动不会引起拖曳运动。

2.3.3 扩散方程

考虑 $t=0$ 时刻位于 $x=0$ 处的颗粒, x 的定位概率 ($\rho(x, t)$) 满足扩散方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \quad (5)$$

其中 D 为扩散系数。

考虑初始条件 $\rho(x, 0) = \delta(x)$, 且令 ρ 满足下面的归一化条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x, t) dx = 1 \quad (6)$$

我们得到:

$$\rho(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (7)$$

即服从高斯分布。

均方根位移 $\langle x^2 \rangle$ 可推导为:

$$\langle x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \rho(x, t) dx = 2Dt \propto t \quad (8)$$

其中 $D = \frac{k_B T}{\zeta}$, k_B 为 Boltzmann 常数, ζ 为摩擦系数。

在我们的尺度上, 黏度可以忽略, 使用激励来移动是一个很好的方法。但在分子尺度上, Brownian 运动能够实现更快的空间变换。在这之间的中间尺度 (μm) 上, 由于高黏度和相对较小的动量, 上述这些方法均

失效。

2.4 (C) 相互作用

第三个要关注的问题是组件间的物理相互作用，在文献 [11, 1] 中很好地研究了物理相互作用机制的可扩展性，尤其是静电和磁的相互作用。这里我们简要描述一下这两种物理量的基本原理。

2.4.1 静电相互作用

假设存在电荷 q_i ，则它所产生的电场 \mathbf{E} 为：

$$\mathbf{E} = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r}|^2} \quad (9)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数。

电荷 q_j 受到的电场力 \mathbf{F}_{ji} 为：

$$\mathbf{F} = q_2 \mathbf{E} \quad (10)$$

$$= \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r}|^2} \quad (11)$$

所以电场力在空间中的衰减是相同的，而与尺度无关。

2.4.2 磁相互作用

将磁铁看作是具有磁矩 m 的偶极子，由磁矩 \mathbf{m}_j 在位置 \mathbf{r} 处产生的磁势 $\phi_j(\mathbf{r})$ 为：

$$\phi_j(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (12)$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Tm/A}$ 为真空中的磁导率， $\hat{\mathbf{r}} \equiv \mathbf{r}/|\mathbf{r}|$ ，并假设 $|\mathbf{r}| = r$ ，远远大于磁铁的尺寸。偶极子的磁通量为：

$$\mathbf{B}_j = -\nabla\phi_j \quad (13)$$

置于 \mathbf{m}_j 的场中的第二个偶极子 \mathbf{m}_i 获得的磁势能 U_{ij} 为：

$$U_{ij} = -\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{B}_j \quad (14)$$

将式 (14) 关于 r 求导，就可以得到两偶极子之间的力：

$$\mathbf{F}_{ij} = (\mathbf{m}_i \cdot \nabla) \mathbf{B}_j \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ij} = \mathbf{m}_i \times \mathbf{B}_j \quad (16)$$

我们可以确定系统的总势能为：

$$U_{\text{total}} = \frac{1}{2} \sum_{i,j, i \neq j} U_{ij} \quad (17)$$

2.5 工程问题——驱动器电池连接器瓶颈

对于小于几厘米的模块化系统，仍然有三个基本问题需要解决。这些问题与驱动器、电池（或者电源）和连接器技术有关。当设计一个需要大量小尺寸组件的系统时，这些问题的解答就变得非常相关。第一个问题是驱动使得部件具有移动和重构的能力，一个常见的解决方案是使用电气伺服电动机，但这些驱动器通常又大又重。人们还提出了其他的驱动方法，比如气动驱动器，尽管它们重量较轻，但它们需要压缩空气源（比如压缩机）。第二个问题则是为驱动器提供电源，一个最常用的方法是使用电池。使用电池产生的问题是它们只能提供有限时间的电源，而且它们初始充电的变化会导致不均匀的驱动组件。另一个常用的解决方案是通过键合位置传递电流，不幸的是，这种方法具有连接点必须非常精确地对准等缺点；此外，这种组件不能与主体结构分开，这就阻碍了为移动型机器人供电的方式。第三个问题是连接机制使得模块部件相互对接在一起，键合对于重组和保持所需结构非常重要，最常用的键合方法是磁铁和机械锁扣。

A 驱动器

B 电池

C 连接器

这些问题之间具有较强的相互依赖性。对连接机制和驱动器的需求，部分地由每一个组件的重量决定，组件越重，需要加在键合位置上的力也越大。此外，驱动器必须提供较大的力矩来移动组件，而使用更强的组件通常会导致组件更重。同样，由于连接机制和驱动器变得更强大，使得功率消耗也大幅增加。令人奇怪的是，模块化部件的小尺寸和重量减小并不是解决该问题的很好的方法，因为不只是绝大多数常用的驱动器的功率或重量比会随着尺寸的减小而减小，而且常用连接器的强度或重量比也会随着尺寸的减小而减小。这就意味着那些驱动模块化机器人、为模块化机器人供电和连接模块化机器人的最常用的方法不能用于小尺寸实体，所以有必要为 A, B, C “瓶颈”提出新的解决方法，来推动小尺度自组装机器人的发展。

3 案例研究

本节中我们将基于我们研究组中应用的一个案例，来研究讨论如何评估自组装的动力学（详见文献 [25]）。我们在实验中使用了 Tribolon 平

台^[23]，它由漂浮在水面上的厘米尺寸的模块组成。实验共准备了12个模块，且每一个模块上都安装有磁铁（每一个上都有一个立方体永久磁铁，其磁通密度为1.3 T，尺寸为5 mm×5 mm×5 mm），磁铁都安装在模块的底部并朝向相同的方向，这样模块之间就会相互排斥（比如北极都朝上，如图6所示）。除了安装有永久磁铁外，有一半的模块安装有振动电动机（称为主动模块，与那些没有安装磁铁的被动模块相区别），这样它们能够通过受电弓从天花板上振动接受功率。在振动模块基板的顶部安装有一个扁平无铁芯的振动电动机（T.P.C DC MOTOR FM34F, 12 000 ~ 14 000 r/min (2.5 ~ 3.5 V)）来诱发自我推进运动。当在天花板上施加一个电势时（见图6（b）），电流从受电弓流向振动电动机，并通过浸没在导电性水中的电极返回大地。正因为这种设置，所有模块都会接收到相同的恒定的功

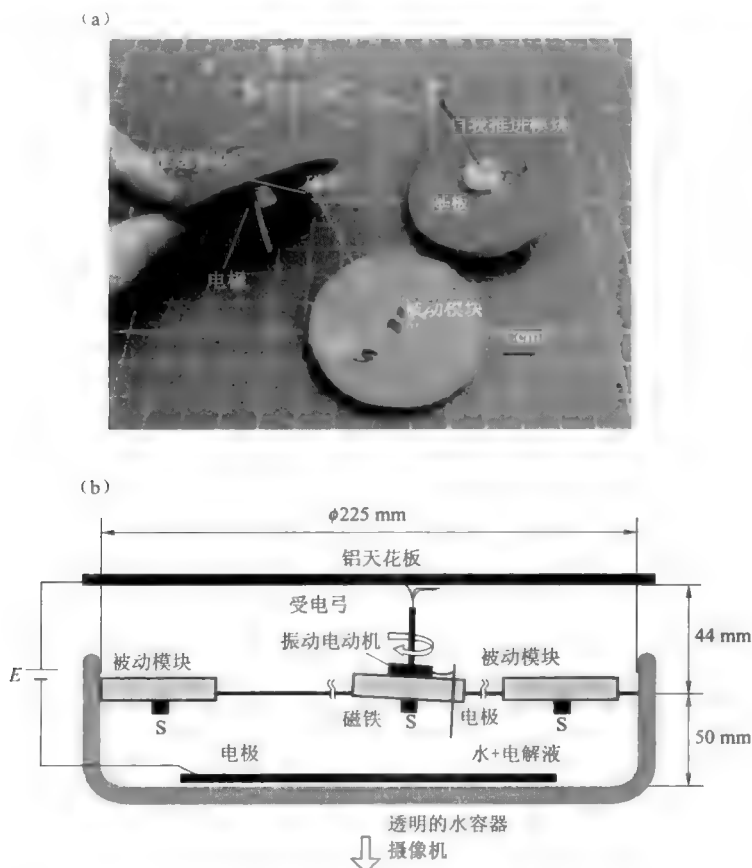


图6 (a) 被动模块的自我推进，每一个模块质量为2.8 g，占据面积12.25 cm²；(b) 具有三个模块的实验环境

率,且它们的重量较轻(每个 2.8 g),而如果使用电池则不会实现这种情况。

为了统计分析,我们共进行了 15 组实验。图 7 中以时间序列展示了分异行为的代表性结果,所设置的最初的起始条件如图 7 (00:00) 所示,其中所有的模块在一个环内对称地交替排列,这样被动模块和振动模块在分异过程中具有同等的机会,设置实验过程持续 90 s。

为了进行分析,使用开源跟踪软件 Tracker Video Analysis and Modeling Tool^[9]追踪所有模块的踪迹(位置)。我们的观察过程是,红色主动模块趋向于远离蓝色被动模块并组装在一起,从而可以在空间上区分两种不同的模块簇:第一种簇只包含主动模块,而第二种簇只包含被动模块(见图 7 (00:75))。

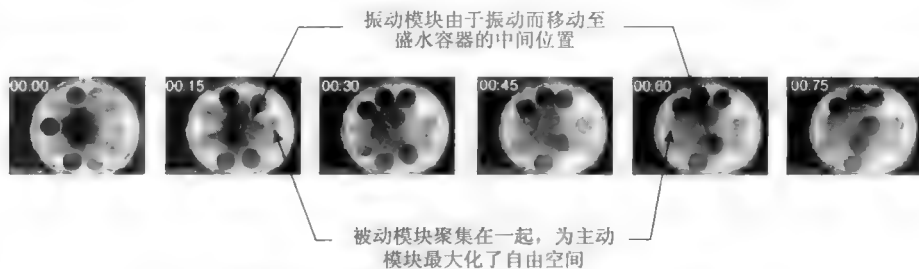


图 7 按时间先后顺序排列的实验结果。每隔 15 s 捕捉一次

磁势能和质心距离

通过归一化式(17)中定义的能量,将系统的磁势能定义为 $U'_{\text{total}} = U'_{\text{total}} / \left(\frac{\mu_0}{4\pi} m^2 \right)$, 图 8 (a) 中给出了该结果关于时间的函数,误差棒表示在十五次实验过程中不确定性的标准偏差。由于系统的特性,即非平衡系统,磁势能不断下降。假如系统全部由被动模块组成,则系统会最终成为所有模块均等分布且固定的状态。

模块组(或簇)的质心 $(X, Y) = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i), \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i) \right)$ 为模块质量的中心,其中 N 为模块组中模块的数量, x_i 和 y_i 分别为所考虑组的第 i 个组件的位置。我们计算了两个模块组间质心差的时间演化(一侧为被动模块,另一侧为主动模块),如图 8 (b) 所示。在图 8 (b) 中,被动模块和振动模块的质心间存在一个增大的距离,这与两个模块簇的形成过程对应,两簇之间最终的平均距离约为 10 cm。如果给定场景(或容器)的直

径为 22.5 cm，这相当于整个区域的 50%。

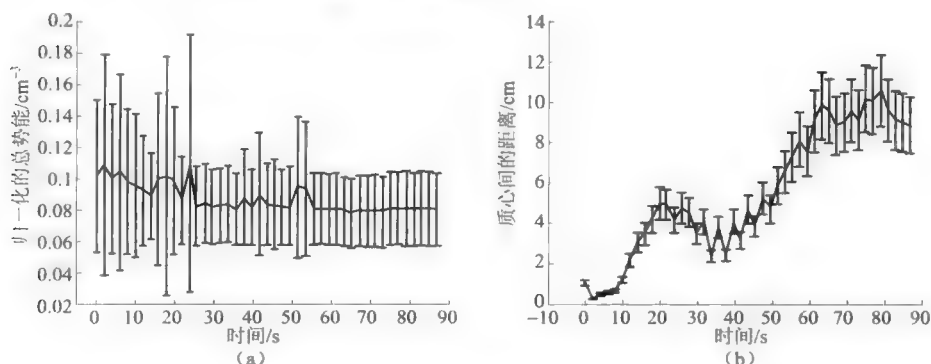


图8 图(a)显示系统的总能量;图(b)为两簇质心间距离的时间演化 ($N=15$)

3.1 瞬态熵（分层社会熵）

本文中熵的定义与科学领域中的定义不同，这要根据其使用的场合不同而不同。在科学领域中三种最为人知的熵可能为热力学熵（适用于热）、统计力学熵（适用于物体）和信息熵（适用于事件）。在自组装中，系统不能够使用信息熵来测定它们的“随机性”，以至于推定一些特定的物理量，比如热量。

Balch 提出了熵（位置有序性）的一种新的定义，它可以用来测定多组件分布（或者定量指标的多样性）^[2]。他使用 Shannon 理论中的 H 为：

$$H(h) = - \sum_{i=1}^N p_i(h) \log_2 p_i(h) \quad (18)$$

其中 $p_i(h)$ 为第 i ($i \in N$) 个簇中模块的数量除以总的模块数量。如果组件的距离在长度范围 h ($\|r_i - r_j\| < h$; r_i 为第 i 个组件的位置) 内时，则该组件属于该簇。Balch 然后在所有可能的 h 上对 $H(h)$ 积分，并将其定义为熵，即

$$S = \int_0^{+\infty} H(h) dh \quad (19)$$

这一定义很好地描述了模块的随机性。注意到在该定义中，熵可以随时间降低。在物理学中，在系统中起作用的熵力是一个宏观力，其特性主要不是决定于特定层面上的微观力（比如电磁力），而是主要取决于整个系统对熵增的统计趋势。我们所研究的系统的熵与式（19）给出的相同，图9给出了系统熵的时间演化。

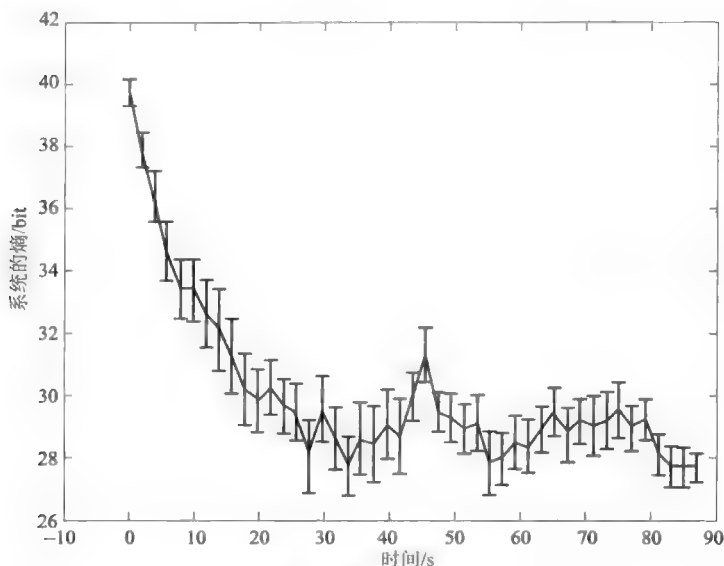


图9 熵的变迁

我们可以看到，系统的熵随着时间的推而减小，这表示系统收敛为一个更加有序的结构，这与前面一节中描述的簇形成一致。

3.2 传递熵

为了发现简单的信息结构，我们使用一种测量来提取主动和被动模块时间序列间的定向流量（信息的传递），将这种测量称为传递熵^[29]。给定两个任意的时间序列 x_t 和 y_t ，传递熵主要用来量化从广义马尔可夫过程的偏离： $p(x_{t+\tau} | x_t) \approx p(x_{t+\tau} | x_t, y_t)$ ，其中 p 表示传递概率。如果从广义马尔可夫过程的偏离较小，则可以认为状态 Y 对系统 X 的传递概率的相关性不大；而如果这种偏离较大，则马尔可夫过程的假设不再有效。假设的不正确性可以表示如下：

$$TE(Y \rightarrow X) = \sum_{x_{t+\tau}} \sum_{x_t} \sum_{y_t} p(x_{t+\tau}, x_t, y_t) \lg \frac{p(x_{t+\tau} | x_t, y_t)}{p(x_{t+\tau} | x_t)} \quad (20)$$

其中的和是在所有的幅值状态上求得的， $TE(Y \rightarrow X)$ 表示 Y 对 X 的影响。传递熵在 X 与 Y 互换时明显非对称，所以该熵可以用来探测两系统间信息的定向交换。

这里， Y 为模块 i 的 d_i^j 的一个时间序列， X 为模块 j 的 d_i^j 的一个时间序列。设置 \lg 的底为 e ，参数 τ 为 1。通过使用传递熵，我们可以估计所有

模块对间的因果关系。

通过代入数据，我们可以简单地计算每一个模块 (d_t^i) 在每一个时间步内的移动距离，如下：

$$d_t^i = \sqrt{(x_{t+1}^i - x_t^i)^2 + (y_{t+1}^i - y_t^i)^2} \quad (21)$$

我们将 d_t^i 的值在 0.0 ~ 12.0 的范围内离散化为 10, 20, 50 和 100 个间隔，所有的 15 次试验都使用 $0 \leq \text{时间步} \leq 44$ ，且取试验平均值。由于样本的数量有限，我们会改变间隔大小并查看其相关度。

图 10 和图 11 中给出了试验的结果，其中编号为 1 ~ 6 的模块为被动模块，编号为 7 ~ 12 的模块为主动模块。从 Bin = 10 (见图 10 (a))、20 (见图 10 (b)) 和 50 (见图 11 (c)) 的结果可以看出， TE (主动 \rightarrow 主动) 的值较高。同样， TE (主动 \rightarrow 被动)、 TE (被动 \rightarrow 主动) 的值相对较高，而 TE (被动 \rightarrow 被动) 的值则较低。这些结果很简单地表明主动单元影响主动单元和被动手单元的迁移。另一方面，被动单元只影响主动单元的

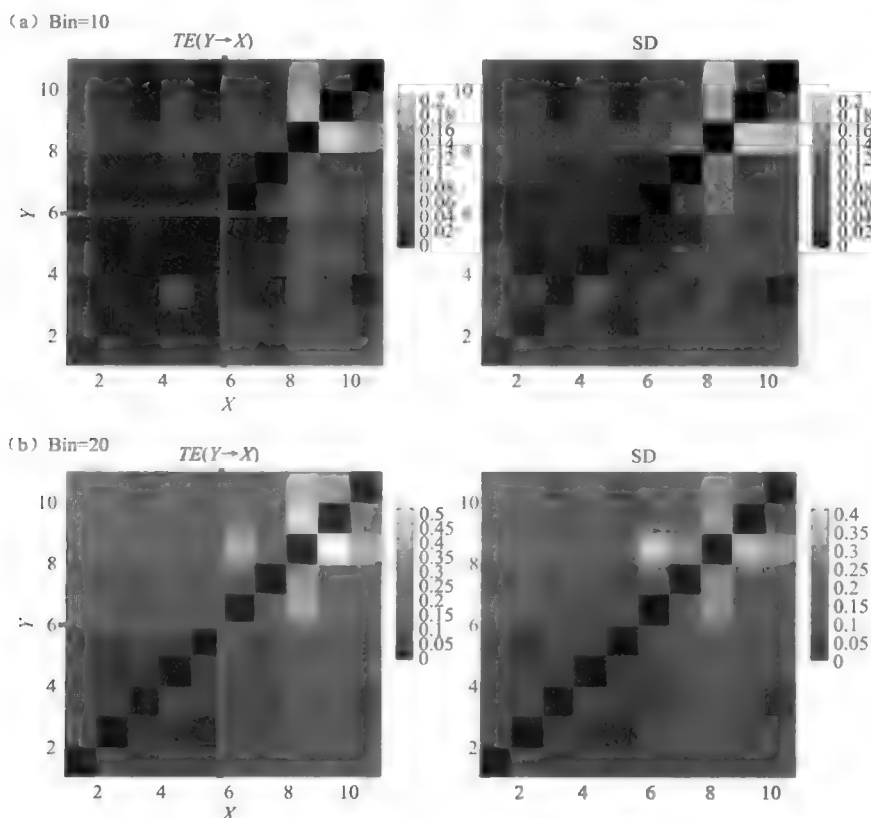


图 10 $TE(Y \rightarrow X)$ 和标准偏差。图 (a) 中，Bin = 10；图 (b) 中，Bin = 20

迁移, $TE(Y \rightarrow X)$ 的值只是其影响的程度。这些结果与我们对系统的自然观察结果一致。对于 $\text{Bin} = 100$ (见图 11 (d)) 的结果, 由于样本 (观察到的时间步) 的数量对于状态空间的尺寸相对较小, 所以它不能构建相对概率密度。

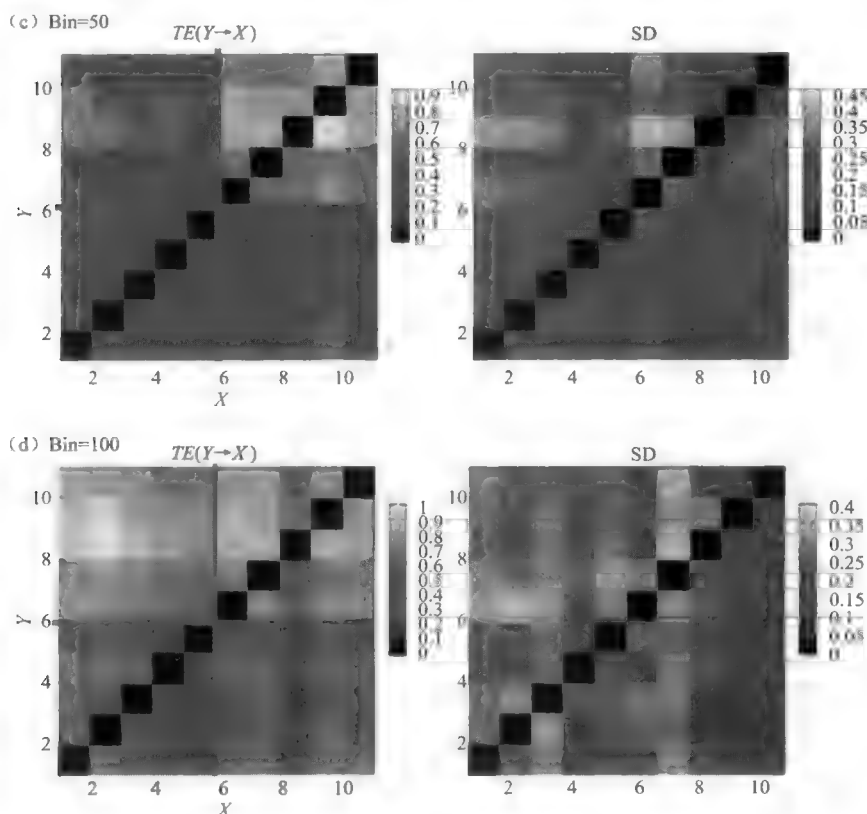


图 11 $TE(Y \rightarrow X)$ 和标准偏差。(c) $\text{Bin} = 50$; (d) $\text{Bin} = 100$

在该系统中, 传递熵趋向于表现为: $TE(\text{主动} \rightarrow \text{主动}) > TE(\text{主动} \rightarrow \text{被动})$, $TE(\text{被动} \rightarrow \text{主动}) > TE(\text{被动} \rightarrow \text{被动})$, 这些结果与我们对踪迹的简单观察结果一致。

在我们的结果中, 传递熵标准偏差 (SD) 的值较大, 这是由数据样本 (时间步) 的数量太少引起的。考虑到实验设置, 推荐将实验的时间步进行合理的延长。此外, 为了探测因果关系, 我们可以根据我们想要发现的内容, 使用其他测定方法, 比如 Granger 因果关系、交互信息、象征性传递熵^[32] 等。特别地, 通过使用象征性传递熵^[32], 能够避免设置间隔大小的困难, 但在这种情况下, 时间步的延长是不可避免的。

我们尽管计算了模块间的信息传递,但同样有可能测定全局行为与单元间的因果关系^[33]。通过这样做,我们能够探测每一个单元如何影响全局行为,以及全局行为如何定量调节每一个单元。

4 结论

我们在本文中系统地研究了关于自组装系统的多种问题。从提出自组装的一些基本问题开始,我们将它们分为三个基本问题,即组装、动力学和相互作用。使用一个案例研究探讨了其定量方法,案例中模块以分布的方式表现出分异行为。我们还进一步研究了描述熵的可能形式,以及控制宏观自组装系统的自由能。我们相信,文中对自组织基本问题逼近方法合适分配的阐述,有助于大家从理论上更加深入地理解这一现象,并将引起有效的自组装系统的实现。

致谢

该研究工作受到瑞士国家科学基金项目的资助 (#200020 - 118117)。

参考文献

- [1] Abbott, J. J., Nagy, Z., Beyeler, F., Nelson, B. J.: Robotics in the small. IEEE Robotics & Automation Magazine 14, 92 - 103 (2007)
- [2] Balch, T.: Hierarchic social entropy: An information theoretic measure of robot group diversity. Autonomous Robots 8, 209 - 237 (2000)
- [3] Boncheva, M., Andreev, S. A., Mahadevan, L., Winkleman, A., Reichman, D. R., Prentiss, M. G., Whitesides, S., Whitesides, G.: Magnetic self-assembly of three-dimensional surfaces from planar sheets. PNAS 102, 3924 - 3929 (2005)
- [4] Boncheva, M., Ferrigno, R., Bruzewicz, D. A., Whitesides, G. M.: Plasticity in selfassembly: Templating generates functionally different circuits from a single precursor. Angew. Chem. Int. Ed. 42, 3368 - 3371 (2003)
- [5] Boncheva, M., Gracias, D. H., Jacobs, H. O., Whitesides, G. M.: Biomimetic selfassembly of a functional asymmetrical electronic device. PNAS 99, 4937 - 4940 (2002)
- [6] Bowden, N., Terfort, A., Carbeck, J., Whitesides, G. M.: Self-assembly of mesoscale objects into ordered two-dimensional arrays. Science 276, 233 - 235 (1997)
- [7] Bowden, N., Weck, M., Choi, I. S., Whitesides, G. M.: Molecule-mimetic

- chemistry and mesoscale self-assembly. *Acc. Chem. Res.* 34, 231 – 238 (2001)
- [8] Breivik, J. : Self-organization of template-replicating polymers and the spontaneous rise of genetic information. *Entropy* 3, 273 – 279 (2001)
 - [9] Brown, D. : Tracker video analysis and modeling tool (2009), [http: // www. cabrillo. edu/ ~ dbrown/tracker/](http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/)
 - [10] Cohn, M. B. , Kim, C. – J. : Self-assembling electrical networks: An application of micromachining technology. In: *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 490 – 493 (1991)
 - [11] Cugat, O. , Delamare, J. , Reyne, G. : Magnetic micro-actuators and systems (MAGMAS). *IEEE Trans. Magnetics* 39 (5), 3607 – 3612 (2003)
 - [12] Demaine, E. D. , Hohenberger, S. , Liben-Nowell, D. : Tetris is hard, even to approximate. Technical report, Cornell University Library (2002), [arXiv. org/](http://arxiv.org/)
 - [13] Gracias, D. H. , Tien, J. , Breen, T. L. , Hsu, C. , Whitesides, G. M. : Forming electrical networks in three dimensions by self-assembly. *Science* 289, 1170 – 1172 (2000)
 - [14] Griffith, S. , Goldwater, D. , Jacobson, J. : Robotics: Self-replication from random parts. *Nature* 437, 636 (2005)
 - [15] Grzybowski, B. A. , Radkowski, M. , Campbell, C. J. , Lee, J. N. , Whitesides, G. M. : Selfassembling fluidic machines. *App. phys. lett.* 84, 1798 – 1800 (2004)
 - [16] Grzybowski, B. A. , Stone, H. A. , Whitesides, G. M. : Dynamic self-assembly of magnetized, millimetre-sized objects rotating at a liquid-air interface. *Nature* 405, 1033 (2000)
 - [17] Grzybowski, B. A. , Winkleman, A. , Wiles, J. A. , Brumer, Y. , Whitesides, G. M. : Electrostatic self-assembly of macroscopic crystals using contact electrification. *Nature* 2, 241 – 245 (2003)
 - [18] Hosokawa, K. , Shimoyama, I. , Miura, H. : Dynamics of self-assembling systems: Analogy with chemical kinetics. *Artificial Life* 1 (4), 413 – 427 (1994)
 - [19] Ishiguro, A. , Shimizu, M. , Kawakatsu, T. : A modular robot that exhibits amoebic locomotion. *Rob. Aut. Sys.* 54, 641 – 650 (2006)
 - [20] Klavins, E. : Programmable self-assembly. *IEEE Cont. Sys. Mag.* 27, 43 – 56 (2007)
 - [21] Wilson, M. , Melhuish, C. , Sendova-Franks, A. : Multi-object segregation: ant-like brood sorting using minimalism robots. In: *Proc. Seventh International Conf. on the Simulation of Adaptive Behaviour*, Edinburgh, UK, pp. 369 – 370 (2002)
 - [22] Mao, C. , Thalladi, V. R. , Wolfe, D. B. , Whitesides, S. , Whitesides, G. M. : Dissections: Self-assembled aggregates that spontaneously reconfigure their structures when their environment changes. *J. Am. Chem. Soc.* 124 (49), 14508 – 14509 (2002)
 - [23] Miyashita, S. , Kessler, M. , Lungarella, M. : How morphology affects self-assembly in a stochastic modular robot. In: *IEEE International Conference on Robotics and*

Automation (2008)

- [24] Motokawa, T. : Time of an elephant, time of a mouse. In: CHUO-KORON-SHINSHA, INC. (1992)
- [25] Ngouabeu, A. M. T. , Miyashita, S. , Fuchslin, R. M. , Nakajima, K. , G " oldi, M. , Pfeifer, R. : Self-organized segregation effect on water based self-assembling robots. In: Artificial Life 12, Odense, Denmark (2010)
- [26] Pelesko, J. A. : SELF ASSEMBLY. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton (2007)
- [27] Penrose, L. S. : Self-reproducing. Sci. Amer. 200 (6) , 105 – 114 (1959)
- [28] Purcell, E. M. : Life at low reynolds number. Amer. J. Phys. 45, 3 – 11 (1977)
- [29] Schreiber, T. : Measuring information transfer. Physical Review Letters 85, 461 – 464 (2000)
- [30] Wilson, M. , Melhuish, C. , Sendova-Franks, A. B. , Scholes, S. R. , Franks, N. R. , Melhuish, C. : Brood sorting by ants: Two phases and differential diffusion. Animal Behaviour 68, 1095 – 1106 (2004)
- [31] Stambaugh, J. , Lathrop, D. P. , Ott, E. , Losert, W. : Pattern formation in a monolayer of magnetic spheres. Physical Review E. 68, 026207 – 1 – 026207 – 5 (2003)
- [32] Staniek, M. , Lehnertz, K. : Symbolic transfer entropy. Physical Review Letters 100, 158101 – 158101 (2008)
- [33] Sumioka, H. , Nakajima, K. , Lungarella, M. , Pfeifer, R. : Complexity detection based on bidirectional information flow (submitted)
- [34] Tsutsumi, D. , Murata, S. : Multistate part for mesoscale self-assembly. In: SICE Annual Conference (2007)
- [35] White, P. , Kopanski, K. , Lipson, H. : Stochastic self-reconfigurable cellular robotics. In: Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 2888 – 2893 (2004)
- [36] Whitesides, G. M. : The ‘right’ size in nanobiotechnology. Nature 21 (10) , 1161 – 1165 (2003)
- [37] Whitesides, G. M. , Grzybowski, B. : Self-assembly at all scales. Science 295, 2418 – 2421 (2002)
- [38] Wolfe, D. B. , Snead, A. , Mao, C. , Bowden, N. B. , Whitesides, G. M. : Mesoscale selfassembly: Capillary interactions when positive and negative menisci have similar amplitudes. Langmuir 19, 2206 – 2214 (2003)
- [39] Yamaki, M. , Higo, J. , Nagayama, K. : Size-dependent separation of colloidal particles in two-dimensional convective self-assembly. American Chemical Society 11, 2975 – 2978 (1995)

第三部分

机器人系统中的自主式智力开发

第九章 类人脑的时间处理

Juyang Weng

密歇根州立大学, East Lansing, MI, 美国

摘要: 本文提出了一种通用的大脑模型, 称为发育网络 (DN)。根植于生物基因组等效原理, 我们的模型提出了一种通用的、以细胞为中心的就地学习框架, 以此来处理大脑发育和运作的所有层次上的问题, 从细胞层次直到大脑层次。本文将大脑之“迷”阐述为五种必要的“部分”: 发育、结构、区域、空间和时间。然后阐述了这样一个模型如何能够使一个发育机器人处理时空背景, 它可以处理任何长度的时间范围而不需要专用的时间组件。

1 介绍

众所周知的是, 一个完全编程的机器人只具有非常有限的处理真实世界环境的能力。对于一个很难编程的任务, 可以使用机器学习技术。然而, 传统的机器学习技术是针对具体任务的, 意思是程序员需要在完成他的编程前获得机器人要执行的任务, 程序员在理解任务后, 在机器人的控制程序中植入任务的特定表示。但这种机器人在现实世界环境中会变得脆弱, 因为程序员很难足够地预测所有的任务设置和所有的环境条件。

从幼年到成年的人类认知和行为发育证明, 自主发育是人类智能发育的自然方法 (Piaget, 1954^[13]; Elman 等, 1997^[4]; Weng 等, 2001^[22])。

已经有人进行了几种令人印象深刻的尝试, 来将大脑模仿为一种符号信息处理器 (Albus, 1991^[1]; Hecht-Nielsen, 2007^[7]; Albus, 2010^[2])。但他们使用没有足够的、在生物上近乎合理的学习来说明巨大的大脑复杂

性。由于只有符号建模不足以用来处理不确定性,所以在这种符号模型中增加了贝叶斯概率框架,在空间方面使用概率模型,而在时间方面采用马尔可夫链(Jelinek, 1990^[8]; Lee 和 Mumford, 2003^[9]; Emami 和 Jelinek, 2005^[5]; Tenenbaum 等, 2006^[16]; George 和 Hawkins, 2009^[6])。这种贝叶斯模型的一个主要优点是它们对于人类的理解具有直观性,但它们面临一个基本的问题:它们不是发育而来的——不同内部单元(节点或马尔可夫链)之间的象征性边界(“壁面”)是由程序员来定义的。

实际上,它们都对应一个大脑的“人脑开放方法”——这是理解一个给定任务和所需概念的人类老师,然后以其开放“人脑”直接操纵(定义)“大脑”的内部表示。这种“开放式人脑”的方法的诸多局限性有:

① 它是一种静态的手工信息处理器,不能够解释大脑发育的奇迹。它不能够解释下面的过程:幼儿使用其“封闭的大脑”与环境进行自主交互作用,并自主学习和发现那些他的父母不曾知道的概念。自主发现是大脑发育的一个奇迹。

② 建立和打破真实世界环境是一个劳动密集型的工作。给定一个任务后,手工制作一个类人脑的信息处理器需要为每一个任务的内部表示的实例化耗费大量的工时。而由于人类不能足够地预测动态的真实世界,所以得到的系统是脆弱的。

许多计算机视觉研究人员认为,人类的视觉系统足以用一个静态的对象识别器来模拟。这是不成立的,大脑一直在学习新的对象和新的对象变化。

受到人类智力从概念开始到发育的启发,发育机器人是一种能够从与环境的相互作用中自主开发其智力技能和任务执行能力的机器人。图 1 阐述了自主智力发育的范例(Weng 等, 2001^[22])。

就我们所知, Cresceptron (1993)^[19,20]是第一种从复杂自然背景中进行视觉学习的发育原型。我们的意思是,通过发育,内部表示是完全来自于环境的相互作用的自然发生,而不需要人类进行特定任务表示的人工示例。

在本文中,将我们最新提出的大脑的通用模型集中在一个基本单元上,该基本单元为区域,并将该模型称为发育网络(DN),其后将主要的研究集中在 DN 模型的时间特性上,如图 1 所示。

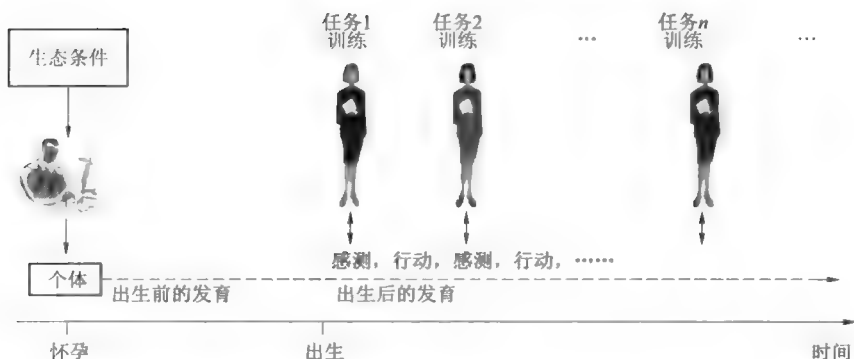


图1 机器自主智力发育的范例, 受到人类智力发育的启发。在编程阶段(即概念阶段)没有给定任务, 必须提前准备一个通用的非特定任务的发育程序并将其载入至机体“大脑”。出生之前的发育能够使用“自发的”(内部产生)的信号(比如从传感器和电动机获得)在“出生”前为“大脑”连线, 在“出生”后, 机体通过与物理世界的相互作用开始学习各种开放的技能 and 任务。在发育过程中, “大脑”处于“人脑关闭”状态, 意味着在怀孕后程序员不需要直接侵入大脑内部进行内部表示。机体在其整个生命过程中学习的任务由它出生后其他使用者来决定, 所以, 大脑的内部自组织是完全自主的(即自然发生的表示)

2 大脑模型的五个部分

根植于生物基因组等效原理, 我们的模型提出了一种通用的、以细胞为中心的就地学习框架, 以此来处理大脑发育和运作的所有层次上的问题, 从细胞层次直到大脑层次。它将大脑之“迷”阐述为五种必要的“部分”: 发育、结构、区域、空间和时间。尽管生物大脑具有许多特性, 但这五个“部分”是大脑之“迷”中基本的特点:

(1) “发育”部分意味着任何实际的大脑, 自然的或是人造的, 都需要通过与自然环境的相互作用来自主地发育, 而不需要任何的给定任务集。

(2) “结构”部分用来处理:

① 复杂的背景, 在背景中信噪比至少小于 1 dB (<1 dB), 或者等价地, 与当前行动不相关的输入分量比那些相关分量更多。

② 使用任何抽象和具体的环境来抽象、推理和泛化。

③ 多传感特征和多电动机特征以及它们的整合。

(3) “空间”部分使用所有实际的复杂背景来处理实际的前景物, 包括冲突不变性和类型、位置、尺寸、方向、表达等的特异性标准。从外

界学习而来的依赖于环境的空间注意力是处理所有这些冲突空间标准的关键能力。

(4) “区域”部分用来解决功能开发和区域表示的问题，不必硬性规定每一个神经元做什么。

(5) “时间”部分表明大脑会利用其内在的空间机制来处理时间，而不需要专门的时间组件。该模块可应对实际的时间环境，包括时间规整、时间持续、时间注意力、时间长度等的冲突判据

我们在下文给出了 DN 模块的组件：一个基本单元作为一个三区域网络。

3 生物发育

人从怀孕时间起便开始发育，在那时形成了称为受精卵的单个细胞。在生物学中，“基因型”一词表示一个有机体的所有或者部分的基因组成，“显型”一词表示一个有机体的所有或者部分的可见特性，该有机体是通过基因型与环境的相互作用产生的。在受精卵中，将所有的遗传组成称为染色体，它们绝大多数寄居在细胞核内。在人的怀孕阶段，一个称为发育程序的生物程序开始运行，该程序的编码为染色体，但该程序的运行需要整个细胞以及细胞的环境都正常运行。

生物发育程序处理两种类型的发育，身体发育和神经发育。前者为身体内除大脑外所有的发育，而后者为大脑（或者中枢神经系统 CNS）的发育。一个正常的孩子通过身体发育在尺寸和重量上增长，并伴随有许多其他的物理变化。同样，一个正常的孩子通过神经发育与环境的相互作用来发育一系列的心智能力。心智能力是指所有已知的大脑功能，包括但不限于知觉、认知、行为和动机功能。在本章中，如果没有特别声明，“发育”一词均指神经发育。生物体的神经发育与身体发育同时发生，而且它们之间紧密关联。例如：如果眼睛没有正常发育，视觉功能将会受到极大的影响。在人工机体的发育中，可以设计并固定身体（并非自主发育），这有助于减小自主神经发育的复杂性。

基因组等价原理^[4]是一个对于我们理解生物发育如何进行调控非常重要的生物学概念。该原理表明，每一个细胞核（不只是在受精卵中）的基因组在功能上是完整的——足以调控从单个细胞到整个成年生命的发育过程。这一原理被克隆所完全证实，这意味着没有基因能够作为一个整体比一个细胞的贡献更多，所以，有染色体主导的发育是以细胞为中心的。每

一个细胞携带一组完整的基因并作为一个自主机，必须在其与外界环境（比如其他细胞）的相互作用过程中处理其自身的学习。在大脑内部，每一个神经元都是就地发育和学习，它不需要神经元外的任何专门学习者。例如：它不需要细胞外学习者来计算其输入线和细胞外存储中的协方差（或其他矩阵或偏导数）。如果一个人工发育程序只根据神经元自身的可用信息来发育每一个人工神经元（例如：突触前活动的细胞环境、细胞内的发育程序和其他可在细胞内生物存储的信息），我们称这种类型的学习为就地学习。

这一“就地”概念比常用的“局部学习”概念更加具有约束性。例如：一个局部学习算法可能会需要计算突触前矢量矩阵的协方差，而该突触前矢量必须存储在细胞外。在电子学中，就地学习原理除了具有生物合理性外，还能够极大地减小所需要的电子器件和存储空间。比如，假设每一个生物神经元都需要其突触前矢量的偏导数矩阵，大脑中一个神经元中突触的平均数量为 $n = 1\,000$ 的数量级，每一个神经元在神经元外大约需要 $n^2 = 1\,000\,000$ 个存储单元，这对应于大脑中大约 $1\,000\,000$ 的突触总数量（ 10^{14} ）！

从概念上讲，一个神经元的命运和功能不是由外部环境“手工设计”的内容所决定，这是基因等价原理的另一个结果。每一个系统中的染色体调控细胞的有丝分裂、分化、迁移、分支和连接，但它不会调控在收到其他连接细胞的信号时细胞要进行的内容。例如：我们能够发现一个 V1 细胞（神经元）对一个特定方向的边缘做出响应。这只是细胞的许多自然特性的一个方面，它们是细胞自身生物特性和其环境活动的结果。一个发育程序不需要，也不应当指定哪一个神经元探测一个预定义的特征类型（比如一个边缘或者运动）。

4 为何是自主神经发育？

人们可以发现，生物发育是非常“低级的”，只调控单个神经元。那么，为什么非要使我们的复杂电子机器能够进行自主发育？我们为什么不能在机器中植入高级的概念，以使它们能够执行我们的高级指令？实际上，这正是许多年来人们正在进行研究的许多象征性的方法。不幸的是，研究得到的集群是非常脆弱的——当环境掉入由程序员建立的领域时，它们在现实世界中惨遭失败。

为了充分理解机器在执行复杂任务时所遇到的问题，Weng^[17] 介绍了一种称为任务混浊的概念。一个任务的复合混浊是许多单一混浊程度的增

殖产物，有许多种可能的单一混浊程度。那些单一混浊程度并不需要相互之间独立或者处于同一个抽象层次上，因为这种要求既不实际，对于描述任务的混浊度也无必要。可将它们分为五类：① 外部环境；② 输入；③ 内部环境；④ 输出；⑤ 目标（见表1）。“外部”一词是指大脑的外部，而“内部”一词指的是大脑的内部。

表1 一个任务的混浊因素

种类	因素	干净	↔	混浊
外部环境	意识	已知		未知
	复杂性	简单		复杂
	受约束性	可控		不可控
	变化	固定不变		一直在变
	可预见性	可预见		不可预见
输入	有无经验	象征性的		实际传感器
	尺寸	小		大
	背景	无		复杂
	变化	简单		复杂
	闭塞	无		严重
	积极性	被动		主动
	模式	简单		复杂
	多模式	单一		多种
内部环境	尺寸	小		大
	表示	给定		未给定
	可观察性	可观察		不可观察
	不可能性	不可能		可能
	时间范围	简单		复杂
输出	终端	低		高
	尺寸	小		大
	模式	简单		复杂
	多模式	单一		多种
目标	丰富	低		高
	可变性	固定		可变
	可用性	给定		未知
	告知模型	文本		多模式
	输送模式	简单		复杂

一个任务的复合混浊可以看作是所有单个混浊程度的产物，换句话说，当所有五个类型都具有较高的混浊程度时，该任务将非常混浊。一个具有符号输入和输出的下棋任务是一个干净的任务，因为其①到⑤类型的混浊程度都较低。一个符号语言翻译问题在类型①②和④上混浊程度较低，在③上居中，但在⑤上混浊程度较高。为自然人类环境进行视觉导航的任务在①②③和⑤上混浊程度较高，而在④上居中。一个成年人能够处理那些在所有五个类型上混浊程度都较高的极其混浊的任务。

从表1的混浊度列表中，我们对成年人的日常任务处理有了更加详细的理解，比如导航或者在城市环境中驾驶。Weng^[17]提出了人类或机器能够执行的许多任务的复合混浊度，它被看作是度量所需智力的标准。

一个新生婴儿不能完成那些成年人日常进行的混浊任务，心智发育的过程有必要去发育这些多种多样的心智技能。发育心理学中的许多证据已经证实，不只是发育过程对人类的智力形成有必要，发育的环境对于正常的发育同样重要。

同样，程序员给一个机器编程，使其成功执行一个混浊的任务，是不切实际的。计算机对干净任务的执行非常有效，比如下棋，但它们在执行混浊任务时则表现极差，比如视觉和语言理解。使一个机器在其真实任务环境中自主地开发其执行任务的技能是一个唯一的方法，这对混浊任务已经被证实是成功的——不存在用于执行混浊任务的更高智能不是通过自主发育而来的。

5 基本组成部分

生物基因组等价原理表明，就染色体来说，细胞是其发育和运作过程中的通用机构。所有细胞都是从单个受精卵细胞通过许多回合的有丝分裂而来的，该过程中大脑中的许多细胞变得越来越分化^[14]，这意味着它们从脑室中的祖细胞产生后，在迁移过程中变得更加专门化。然而，有丝分裂在发育的大脑中不断地进行，其中每一个细胞的离去（细胞迁移）、如何长大（细胞扩张）、如何扩展（轴突和树突寻路）、是否存活（神经营养因子）、突触形成和突触消失（突触因素），这些都依赖于细胞活性。这种以细胞为中心的自主性，同时与附近环境相互作用，为我们的DN模型提供了基础，该模型将任意的细胞组（神经元）处理为一个单元。这一方案有助于理解发育的大脑，而不被表象的高度复杂性淹没。

考虑这样一个一般区域 Y ，它具有传感区域 X 和其电动机区域 Z （见

图2)。对于每一个单元,其传感区域同样是一个对其自上而下注意力(自我影响)的输出端口,其电动机区域同样是一个对其自上而下感测(自我察觉)的输入端口。较低的大脑(比如中脑)发育较早,所以更高的大脑(比如前脑)作为一个基本单元能够随后支配较低的大脑。

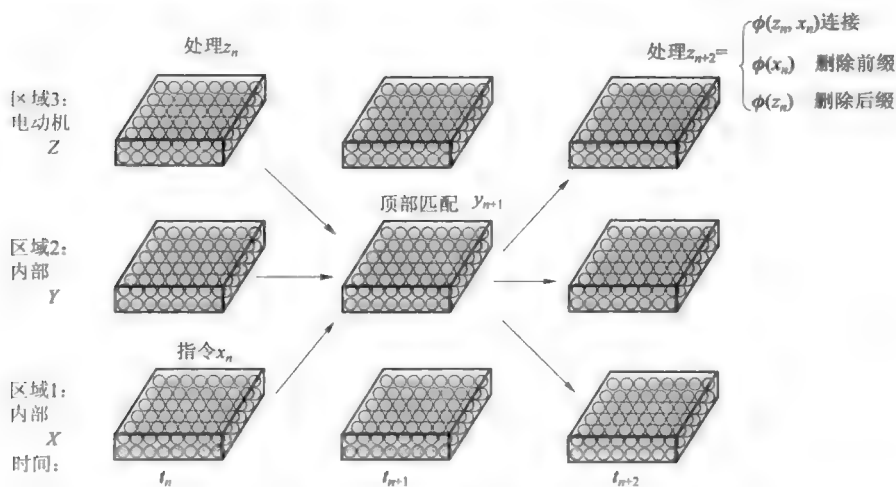


图2 用于空间处理和时间处理的空间DN,不需要专门的时空组件。在上面所示的每一个时间单元(两个时间框架)中,有三种基本的可能操作:连接,删除前缀和删除后缀。经过合理的训练后,DN能够达到任何可能时间环境中的时间采样分辨率

由于需要解决复杂背景问题,DN模型提供了一种更深层次的需要:比 X 和 Z 更小的接受区域和有效区域。如果一个神经元的接受区域与前景对象匹配良好,则神经元对背景响应不会太灵敏。

我们使用该基本单元测试了从复杂背景中识别通用的空间物体,其实验结果将在其他地方给出。在本章中,我们主要关注DN的时间方面。

DN在执行的同时学习,假设DN有 l 层, $1 \sim l$ 在 $t=0$ 时刻,每一层所具有的权重为在不同位置由高斯权重进行神经元初始化后的权重。然后,DN计算如下。

算法1 (DN) 输入区域: X 和 Z ;输出区域: X 和 Z 。 X 和 Y 区域的尺寸和表示基于传感器和物种的效应器(或从生物学中的进化)手工设计。 Y 为大脑封闭的内部大脑,不可有大脑外的世界直接进入。

(1) 在 $t=0$ 时刻,对于 $\{X, Y, Z\}$ 中的每一个区域 A ,初始化其自适应部件 $L = (V, A, r)$,其中 V 包含了所有的突触权重矢量, A 用来存储所有的神经元年龄, r 为每一个神经元激励球的半径,根据一种初始化

方法对 L 进行初始化。

(2) 在 $t=1, 2, \dots$, 时刻, 对于 $\{X, Y, Z\}$ 中的每一个区域 A , 永远重复执行如下步骤:

- ① 从自下而上的输入 b 和自上而下的输入 t 中读取, 如果存在的话。
- ② 如果需要的话, 每一个区域 A 执行有丝分裂, 分别使用其自下而上的输入 b 和自上而下的输入 t 。
- ③ 每一个区域 A 计算其面积函数 f , 将在下一节介绍,

$$(r', L') = f_{LCA}(b, r, t, L)$$

其中 r 和 r' 分别为输入和输出响应。

- ④ 对每一个区域 A 作替换: $L \leftarrow L'$ 和 $r \leftarrow r'$ 。

在算法中, LCA 表示脑叶成分分析^[21], 它是一个双重的优化模型, 用于更新一个神经元层:

(1) 空间最优: 目标神经元权重在最小化层输入空间 $P = X \times Z$ (自下而上输入空间 X 和自上而下输入空间 Z 的并行输入空间) 的表示误差上是最优的, 它使用有限数量的神经元。

(2) 时间最优: 所有神经元在不同步进上的学习方向和步进尺寸在最小化估计权重与它们目标权重之间的距离上是最优的。

空间最优表明在每一层中网络是最小的, 而时间最优表明网络使用有限的学习经验以最快的速度学习。

6 脑叶成分分析

一般的神经区域包含几个层次, 用皮层结构表示, 就像在文献 (Luciw 和 Weng, 2010^[10]) 中讨论的那样, 这样的结构可以避免自上而下的幻觉。这里为了简便, 我们考虑一种更加简单的情况, 其中每一个区域只有一层。

每一个区域执行直观无协方差增量 (CCI) LCA 算法 f_{LCA} 。它以增量的方式更新其神经元层的适应性部件 $L = (V, A, r)$, 其中 $V = (v_1, v_2, \dots, v_c)$, 包含 c 个突触矢量; $A = (n_1, n_2, \dots, n_c)$, 由相应的触发年龄组成; r 为每一个神经元激励球的半径。

每一个输入采样的形式为 $(x, z) = X \times Z$, 其中 X 为自下而上的空间, Z 为自上而下的输入空间。矢量 x 和 z 在送入 f_{LCA} 前进行了归一化, 这将在后面讨论。在网络中, X 或 Z 具有多重的平行输入子空间。在算法上, f_{LCA} 将 L 看作是当前的层次, 将 (x, z) 分别看作是自下而上和自上而下的输

入, 以此来产生响应矢量并更新其表示 L :

$$(y, L) \leftarrow f_{LCA}(x, y, z, L)$$

CCI LCA 算法如下:

算法 2 (LCA 初始化)。使用 c 个高斯函数和触发年龄 $n_i = 0$ 初始化突触矢量 v_i , 每一个高斯函数具有一个不同的均值向量, 它们使用一个位于 $[0, 0.1]$ 内的小的随机数来对 y_i 做出响应, $i = 1, 2, \dots, c$ 。

CCI LCA 更新是一种细胞自主式更新, 意味着当每一个神经元更新时, 它只要简单地使用其他神经元的当前可用响应值, 不需要使用任何全局时钟进行等待。这对时间过程非常重要。

算法 3 (CCI LCA 更新)。输入: x, y, z, L ; 输出: y, L 。

(1) 计算预响应。根据层在网络中的位置, 进行外部或者内部输入 $p = ((1 - \alpha)x, \alpha z)$ (对自下而上的输入 x 进行对比归一化通常会改进性能, 例如: 如果 x 是归一化的, 这样其最小分量为 0, 最大分量为 1), 这里 z 可能被过度示教, 如果 z 为一个外部部分, α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 为自上而下输入的相对权重。计算赛前响应 (下一步用细胞的非线性逼近 S 型函数, 这里的模型可以扩展至一个尖峰神经元模型, 它对更高的时间分辨率非常有用):

$$y_i = \frac{v_i \cdot p}{\|v_i\|}, i = 1, 2, \dots, c \quad (1)$$

(2) 动态稀疏编码的神经元相互抑制。为了模拟一个相对较低更新频率的旁侧抑制, 使用这种非迭代的排序和缩放机制 (这种排序和缩放机制是对生物就地抑制的一种近似, 它不是就地的, 因为它需要细胞外的排序, 但它对一种 LCA 层次内消除迭代的计算非常有效)。排序时只有前 $k + 1$ 个胜利者, 所以在排序后, 其响应为 $y_1 \geq y_2 \geq \dots \geq y_c$ 。使用一个分段线性但全局上非线性的函数来缩放该响应:

$$y_i \leftarrow \frac{y_i - y_{k+1}}{y_1 - y_{k+1}}, i = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

对于 $i = k + 1, k + 2, \dots, c$ 的所有其他神经元不能触发 $y_i = 0$ 。这一排序和缩放机制代替了发生在同一层内双向连接的神经元中重复的迭代。这一模拟 L5 促进了 I2/3 的旁侧抑制, L6 促进了 I4 的旁侧抑制³。

(3) 最优 Hebbian 学习。使用突触前活动 p , 突触后活动 y_j 和其依赖于触发年龄的可塑性只更新前 k 个获胜者的神经元 $v_j, j = 1, 2, \dots, k$:

$$v_j \leftarrow w_1(n_j)v_j + w_2(n_j)y_j p \quad (3)$$

其中学习率 w_2 和保留率 w_1 分别由下式确定:

$$w_2(n_j) = \frac{1 + \mu(n_j)}{n_j}, w_1(n_j) = 1 - w_2(n_j) \quad (4)$$

其中 $\mu(t)$ 为一个非负的遗忘函数（遗忘函数 $\mu(t)$ 用于一般的非稳态过程 $u = yp$ ，其中 u 的概率分布缓慢地变化。当 $t \leq t_1$ 时， $\mu(t) = 0$ ，故 $w_2(t) = 1/t$ ；当 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时， $\mu(t) = 2(t - t_1)/(t_2 - t_1)$ ，因此 $w_2(t)$ 在 $0 \sim 2$ 之间线性变化；当 $t_2 < t$ 时， $\mu(t) = 2 + (t - t_2)/r$ ，所以当 t 无约束地增长时， $w_2(t)$ 接近 $1/r$ 。在我们的实验中选择 $t_1 = 20$ ， $t_2 = 200$ ， $r = 2\ 000$ ，这是基于稳定性和快速适应性的需要而选择的）。注意到对于排序靠前的获胜者 $y_1 = 1$ 。只为获胜者更新实值神经元“触发年龄” n_j ： $n_j \leftarrow n_j + \gamma_j$ ， $j = 1, 2, \dots, k$ 。

(4) 横向激励皮层光滑性。同一层上神经元的相互兴奋连接^[3]对于附近神经元探测相似的特征是有用的。在横向激励的计算机模拟中，存在一个从每一个神经元出发的半径为 r 的激励球。不只对前 k 个胜利者进行更新，在激励球范围内的所有神经元都进行更新。在初始化过程中的范围半径起于神经元层大小的一半，当网络成熟时它缓慢减小至 $r = 0$ 。输入 y 用于横向激励。通过前 k 次竞争并根据预响应值来对旁侧抑制进行建模，以此来避免不希望的碰撞。

(5) 长期记忆。那些没有更新的其他神经元保持它们的触发年龄和突触不变，对于 p 的这种情况，它们成为长期记忆。其他更新的神经元在这种情况下为工作记忆。

该算法称为直观无协方差增量 (CCI) LCA 算法，“直观”一词意思是该算法为双优化使用输入中的直观信息，在文献 [21] 中将 LCA 与一些众所周知的方法进行了比较。

7 表示的出现

不像 FSM 或者其概率版本 HMM 和 POMDP，DN 使用如图 2 所示的自然表示（对于三层 DN，最底层的区域为图像输入层，它不参与计算）。DN 具有多层次分布式状态表示 $(y_i^{(2)}, y_i^{(3)})$ ，其中 $y_i^{(l)}$ 表示层 l 的响应矢量。每层 l 都具有其分布式表示的状态呈现，它从空间 $P = X \times Z$ 读取分布式输入，并产生分布式响应 $y \in Y$ 。

7.1 层 2 中的软逻辑

给定 l 层中有限的神经元数量 c ，层中自下而上的输入空间为 X ，层中自上而下的输入空间为 Z 。这样，层的输入空间为 $P = X \times Z$ 。LCA 的理论

表明, 层中 c 个神经元的权重矢量 p_1, p_2, \dots, p_c 通过发育学习, 最优地分布在所观察到的 P 的信号簇中, 这样 P 中那些具有较高概率密度的区域比那些具有较低概率密度的区域吸纳了更多的神经元。对层给定任意的输入对 $p = (x, z)$, LCA 寻找顶层神经元, 这些神经元给出最高的响应 $r(p, p_i)$ (即最佳的匹配):

$$j = \arg \max_{1 \leq i \leq c} r(p, p_i) \quad (5)$$

所以, 最佳匹配的神经元 j 成为未知输入 p 的表示, (当神经元的数量 c 较大时, 顶层匹配的神经元近乎足以成为当前输入 p 的“专家”, 多于 1 个的神经元能够允许触发, 所以由该层而来的触发模式允许输入 p 的子神经元精度估计。)。这样, 层 2 成为一种软逻辑 AND: p 和 p_i 中所有相应的分量在归一化的内积方面必须匹配良好, 这一内积给出了响应 $r(p, p_i)$ 。

7.2 层 3 中的软逻辑 OR

在对层 3 的监督学习过程中, 假设在时刻 t 设置层 2 中的神经元 k 为最高值 1, 进一步假设在时刻 $t-1$ 层 2 中的神经元 j 触发。换句话说, 神经元 k 的自下而上的输入 x_{t-1} 的第 j 个分量较高, 结果是, 关于连接神经元 j 和神经元 k 的突触, 突触前活动 r_j 和突触后活动 r_k 都较高, 然后连接这两个神经元的权重就被加强。在数学上, 根据 LCA 理论, 连接低层中神经元 j 和高层中神经元 k 的权重为:

$$w_{j,k} \approx E \{ r_j r_k | \text{神经元 } k \text{ 触发} \} \quad (6)$$

所以, 当神经元 k 触发时, 神经元 j 将更加频繁地触发, 从 j 至 k 的权重也更高。这样, 与层 3 中神经元 k 同时触发的层 2 中的所有神经元都具有非零的权重, 由于在任何时候层 2 中只有一个 (或一些) 神经元触发, 这对层 3 来说是一种软逻辑 OR: 层 2 中所有与 k 触发神经元对应的情况与层 2 中的目标神经元连接在了一起。

7.3 无局部极值

直观地, 如果在层 2 中拥有足够数量的神经元, 而且也有足量的训练经验, 这一经过训练的 DN 能够使任何光滑的高维度输入-输出映射接近一个所需的精确率, 而自下而上和自上而下对 $p_t = (x_t, z_{t-1})$ 也唯一地决定从层 3 中的所需的动作输出。这种分配方案使用误差反向传播方法最大限度地避免了局部极值问题。

7.4 判别特征

此外, 空间 $P = X \times Z$ 中 c 个神经元的双重最优分配促进了判别特征神

神经元的发育：在式（5）中获胜的神经元对 x 中的错误选择分量并不敏感，它不会影响输出 z ，但对 x 中特征更加敏感的神经元将显著地影响输出 z 。由此导致的结果是， c 个神经元权重 p_1, p_2, \dots, p_c 的双重最优自组织导致在估计 DN 的输出空间时几乎是最小的误差。

8 特性

基于上面的讨论，我们准备给出 DN 的主要特征，它们对于时间处理非常重要。

8.1 依赖于环境的注意力

推论（环境依赖性）：给定外部自下而上的输入 x_t 和自上而下的环境 z_{t-1} 后，三层 DN 网络具有三种内部行为：外部（E）、内部（I）和混合（M），这就意味着电动机输出 z_t 分别只与外部输入 x_t 有关，只与内部自上而下的环境 z_{t-1} 有关，和与两者有关。

证明：就像上面讨论的，层 2 中的最佳匹配特征与 x_t 和 z_{t-1} 两者一致。对于层 3，有三种情况来学习下一个动作 z_t ：① z_t 只取决于 x_t ，② z_t 只取决于 z_{t-1} ，③ z_t 取决于两者，它们分别与 E、I 和 M 对应。学习经验的质量和数量影响输出 z_t 对 z_{t-1} （对于情况 E）或 x_t （对于情况 I）的理想依赖性。

8.2 活动时间规整

假设网络在离散时间 $t = 1, 2, \dots$ 时进行更新，这一离散时间序列能够表示任何网络更新频率。例如：如果每两个连续的时间实例间的时间间隔为 1 ms，则网络的更新频率为 1 000 Hz。将在时刻 t 的传感输入表示为 x_t ， $t = 1, 2, \dots$ ，离散时间序列可看作是在连续物理世界中的采样时间。动态事件在不同的阶段以不同的速度进行的现象称为时间规整，可取的是具有不同时间规整度的物理事件在电动机层上可认为是同种类的事件（例如：在语音识别和动态视觉识别中）。当然，在层 2 上，使用不同时间规整度的表示不同，与 HMM 和 POMDP 的单一状态表示相比，它反映了多区域表示的优点。

例如：下列的两个序列在电动机层上可认为是相同的序列：

```
l w l w l w l w l w l _ l u l u l u l _ l u l u l _ l _ l z l z l z l _ l
l w l w l _ l u l u l u l u l _ l u l u l u l u l _ l z l z l _ l
```

其中 w, u, z 为文字; $|$ 为时限分隔符, 每一个分隔符与一个不同的 t 对应。

对于这一特性, 我们有下面的理论:

理论 1 (活动时间规整): 可以教给 DN 的电动机层执行活动时间规整, 这需要学习。

证明: 应用推论, 对于重复的文字, 学习如图 2 所示的“删除后缀”, 删除重复的空格也类似。对于探测两个由空格分开的 w, z_i 应当与上下文一致, 在接受第二个 w 前它需要一个试验空格。

8.2.1 活动背景

主要目的是交互地训练 DN, 所以它需要依据过去的动态范围内所处的时空环境, 来做出顺序决定。

理论 2 (任意时间长度上的环境): DN 的自上而下的环境的时间长度是任意的, 而且依赖于学习注意力。

证明: 根据推论 1, 通过递归地应用图 2 中所示的“连接”, 在层 3 上可以产生任意长度的历史, 即环境 z_i 代表了一种标签, 需要将该标签贴在最后的自下而上的输入 x_i 上。

理论 3 (任意时间子集的环境): DN 的自上而下的环境 z_i 中的时间环境能够表示自下而上激励的任何子集, 这取决于学习注意力。

证明: 使用如图 2 所示的“删除后缀”或“删除前缀”, 可以简单地删除那些不属于子集的部分。

理论 4 (Flush): 可以将 DN 的自上而下环境 z_i 的时间环境重置为只表示最后的自下而上输入, 这取决于学习注意力。

证明: 根据推论 1, 应用内部 (I) 行为。

理论 5 (任意环境): DN 的自上而下环境 z_i 的时间环境可以表示任意历史长度的自下而上激励的任何子集, 这取决于学习注意力。

证明: 综合上面三个理论, 使用理论 4 从所希望帧的历史开始, 使用理论 3 保持所希望的子集, 并使用理论 2 保持其任何所希望的长度。

理论 5 表明 DN 机体能够学会加入时间环境中的任何部分, 它是复杂语言理解的必需品。

8.2.2 持续时间

时间持续任务是时间规整的反问题, 该问题的目标是计数两事件 a 和 b 间的时间长度。

与上述模型不同,使用其时间响应(比如采样时间)作为基本时间单元的内在属性,DN 能够学会计数。

理论 6 (持续时间): DN 的动作 z_i 能够表示两特定时间之间的任何有限长度时间。

证明:假设由事件 a , $z_i = i$ 表示时间 i , $i = 1, 2, \dots, k$ 。当 DN 感受到 a 时,它使用其动作 z_i 开始计数;当感受到事件 b 时,计数停止。假设 $*$ 为除了 a 和 b 外的干扰项, DN 在遇到一个 $*$ 时需要继续计数,下面为 DN 如何响应。

```
x: | * | * | a | * | * | * | * | * | * | * | b | * | * | ...
z: | _ | _ | _ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | _ | ...
```

8.2.3 新的语句

上面的结果可用于理解如何使用抽象的电动机状态来推广到那些系统没有学过的新的语句。

问题 (新的语句): 假设有四个语义 W_1, W_2, W_3, W_4 , 每一个语义 W_i 有十个同义词 $\{w_{ij} | j = 1, 2, \dots, 10\}$, $i = 1, 2, 3, 4$ 。这样,就有 10 000 个等价的 4 字语句,其格式为 $(w_{1h}, w_{2i}, w_{3j}, w_{4k})$, 其中 $h, i, j, k = 1, 2, \dots, 10$ 。通过交互式地学习相应语句上下文中的同义词,发育机体认识了所有新的语句,这些语句长度为 1~4,且具有格式 W_1, W_2, \dots, W_j , 其中 $j = 1, 2, 3, 4$ 。

这一问题用下面的方法解决。第一课学习单个文字。下面的 x 行表示每一个时间帧上的传感输入,而 z 行表示在相应时间帧上的电动机输出。

```
x: | a1 | a1 | _ | _ | a2 | a2 | a2 | _ | a3 | a3 | _ | a4 | a4 | ...
z: | _ | A | A | _ | _ | A | A | A | _ | A | A | _ | A | ...
```

相应电动机输出的延迟是由于这样的事实:需要为传感器的信息进行两次更新,以越过两个层次从而到达电动机。对 B、C 和 D 进行同样的操作。在第二课中学习两字语句:

```
x: | a1 | b1 | _ | _ | a1 | b2 | _ | _ | a1 | b3 | _ | _ | a1 | b4 | ...
z: | _ | A | AB | _ | _ | A | AB | _ | _ | A | AB | _ | _ | A | AB | ...
```

在第 3 课中,以类似的方法学习 3 字语句,在第 4 课,学习 4 字语句:

```
x: | a1 | b1 | c1 | d1 | _ | _ | _ | _ | a1 | b1 | c1 | d2 | _ | _ | ...
z: | _ | A | AB | ABC | ABCD | _ | _ | _ | A | AB | ABC | ABCD | ...
```

在这些课程中所学到的语句的数量分别为 40、10、10、10,认识的新语句的数量分别为 0, 100 - 10, 1 000 - 10, 10 000 - 10。在该过程中,

DN 总共学习了 70 个语句,但认识了 $90 + 990 + 9\,990 = 11\,070$ 个新语句。当然,没有两个英文单词是完全相同的同义词,细微的差别在 DN 中层 2 的响应中进行表示,但电动机输出是相同的。

在我们出现在其他地方的实验中,复旦大学的 Qi Zhang 博士在层 2 上使用了 64×64 个神经元,他通过训练集测试了每一个信号出现时间后 DN 的更新, DN 从第 23 个信号时刻后完美地 (100%) 认识了所有 70 个训练意思以及 11 070 个新的语句。

8.2.4 复杂性

理论 7 (指数容量): 一个具有 n 个神经元的皮层可区分的模式的数量为指数型 $\mathcal{O}(2^n)$ 。

证明: 每一个神经元至少有两种状态, 触发或未触发, n 个神经元的触发模型的数量至少为 $\mathcal{O}(2^n)$ 。

这是分布式表示与象征性表示相比时的一个较大的优势, 象征性表示需要一个指数数量的符号, 而用自然的分布式表示不需要将符号分配给这些 2^n 个模式。

理论 8 (线性复杂性): 假设每一个神经元的平均突触数量 c 是恒定的, 则具有 n 个神经元的皮层所需的计算量是线性的 $\mathcal{O}(cn)$ 。

证明: 证据是明显的, 因为只需要计算和学习 n 个神经元。如果学习时间为 t , 则时间复杂度为 $\mathcal{O}(cnt)$ 。

由上述两个特征可得到的结论是: DN 使用一个线性空间复杂度和线性时间复杂度来求解指数大小的问题。

9 实验结果

迄今人们已经在下列场合中的 DN 模型进行了测试: 认识时间视觉事件 (Luciw 等, 2008^[11]), 从没有明确立体图像匹配的立体声中辨别时空差距 (Solgi 和 Weng^[15], 2009), 作为时间序列文本处理以推广到基于同义词的新语句, 讲话部分的标注问题和使用自然语言的分层问题 (《华尔街日报》中 Weng 等, 2009^[23]), 早期语言的习得和泛化的建模 (Miyan 和 Weng, 2010^[12])。

10 结论

DN 的电动机区域不只是动作的中枢, 它还用于动作抽象——将不同

的时间环境转换为等效状态,该状态由电动机区域的触发模式表示。任何长度和任何子集的时间环境都能够通过空间 DN 进行参与和抽象,而不需要任何专门的时间组件。最近, Weng (2010)^[18]表明 DN 能够模拟任何的有限自动机。

根据任务环境, DN 能够处理时间规整或确定持续时间。与象征性 HMM、POMDP 不同,同时也与贝叶斯网络需要一个手工的网络结构不同, DN 自己产生其网络结构。DN 在执行的同时学习,而不管在电动机终端上的监控信号是否可用。在在线传感处理的扫描窗口长度上, DN 将指数复杂性转换为一个线性的时间复杂性和线性的空间复杂性。这里引用的同时也在其他地方出现的实验结果已经表明,这种通用的模型能够处理大量的时间环境问题,包括视觉处理和自然语言处理。未来的工作包括在实际发育机器人上测试这种时间能力。

参考文献

- [1] Albus, J. S. : Outline for a theory of intelligence. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics 21 (3), 473 – 509 (1991)
- [2] Albus, J. S. : A model of computation and representation in the brain. Information Science 180 (9), 1519 – 1554 (2010)
- [3] Callaway, E. M. : Feedforward, feedback and inhibitory connections in primate visual cortex. Neural Networks 17, 625 – 632 (2004)
- [4] Elman, J. L. , Bates, E. A. , Johnson, M. H. , Karmiloff-Smith, A. , Parisi, D. , Plunkett, K. : Rethinking Innateness: A connectionist perspective on development. MIT Press, Cambridge (1997)
- [5] Emami, A. , Jelinek, F. : A neural syntactic language model. Machine Learning 60, 195 – 227 (2005)
- [6] George, D. , Hawkins, J. : Towards a mathematical theory of cortical micro-circuits. PLoS Computational Biology 5 (10), 1 – 26 (2009)
- [7] Hecht-Nielsen, R. : Confabulation Theory. Springer, Berlin (2007)
- [8] Jelinek, F. : Self-organized language modeling for speech recognition. In: Waibel, A. , Lee, K. (eds.) Readings in Speech Recognition, pp. 450 – 506. Morgan Kaufmann, San Mateo (1990)
- [9] Lee, T. S. , Mumford, D. : Hierarchical bayesian inference in the visual cortex. J. Opt. Soc. Am. A 20 (7), 1434 – 1448 (2003)
- [10] Luciw, M. , Weng, J. : Where What Network 3: Developmental top-down attention with multiple meaningful foregrounds. In: Proc. IEEE International Joint Conference on

- Neural Networks, Barcelona, Spain, July 18 – 23, pp. 4233 – 4240 (2010)
- [11] Luciw, M. , Weng, J. , Zeng, S. : Motor initiated expectation through top-down connections as abstract context in a physical world. In: IEEE International Conference on Development and Learning, August 9 – 12, Monterey, CA, pp. +1 – 6. (2008)
- [12] Miyan, K. , Weng, J. : WVN-Text: Cortex-like language acquisition with What and Where. In: Proc. IEEE 9th International Conference on Development and Learning, Ann Arbor, August 18 – 21, pp. 280 – 285 (2010)
- [13] Piaget, J. : The Construction of Reality in the Child. Basic Books, New York (1954)
- [14] Purves, W. K. , Sadava, D. , Orians, G. H. , Heller, H. C. : Life: The Science of Biology, 7th edn. Sinauer, Sunderland, MA (2004)
- [15] Solgi, M. , Weng, J. : Developmental stereo: Emergence of disparity preference in models of visual cortex. IEEE Trans. Autonomous Mental Development 1 (4), 238 – 252 (2009)
- [16] Tenenbaum, J. B. , Griffithsb, T. L. , Kemp, C. : Theory-based bayesian models of inductive learning and reasoning. Trends in Cognitive Sciences 10 (7), 309 – 318 (2006)
- [17] Weng, J. : Task muddiness, intelligence metrics, and the necessity of autonomous mental development. Minds and Machines 19 (1), 93 – 115 (2009)
- [18] Weng, J. : A 5 – chunk developmental brain-mind network model for multiple events in complex backgrounds. In: Proc. Int' l Joint Conf. Neural Networks, Barcelona, Spain, July 18 – 23, pp. 1 – 8 (2010)
- [19] Weng, J. , Ahuja, N. , Huang, T. S. : Learning recognition and segmentation of 3 – D objects from 2 – D images. In: Proc. IEEE 4th Int' l Conf. Computer Vision, pp. 121 – 128 (May 1993)
- [20] Weng, J. , Ahuja, N. , Huang, T. S. : Learning recognition and segmentation using the Cresceptron. International Journal of Computer Vision 25 (2), 109 – 143 (1997)
- [21] Weng, J. , Luciw, M. : Dually optimal neuronal layers: Lobe component analysis. IEEE Trans. Autonomous Mental Development 1 (1), 68 – 85 (2009)
- [22] Weng, J. , McClelland, J. , Pentland, A. , Sporns, O. , Stockman, I. , Sur, M. , Thelen, E. : Autonomous mental development by robots and animals. Science 291 (5504), 599 – 600 (2001)
- [23] Weng, J. , Zhang, Q. , Chi, M. , Xue, X. : Complex text processing by the temporal context machines. In: Proc. IEEE 8th International Conference on Development and Learning, Shanghai, China, June 4 – 7, pp. +1 – 8 (2009)

第四部分

特殊应用

第十章 关于多头绒泡菌机器人

Jeff Jones, Soichiro Tsuda, Andrew Adamatzky

西英格兰大学非常规计算研究组, Bristol, BS16 1QY, UK, e-mail:
{jeff.jones, so.tsuda, andrew.adamatzky}@uwe.ac.uk

摘要：黏菌中的多头绒泡菌对于小规模机器人来说是一种合适的候选生物体，它们会自发地进行输运、移动和导航，能够通过非常简单的成分交互来表现复杂的行为。多头绒泡菌可被认为是一种智能计算材料，因为它们的驱动和控制系统分布在一个简单的组织类型中，并在遭受创伤的情况下仍然能够生存，比如原生质切除、分裂和熔合。我们在实验中证实了多头绒泡菌原质团为何能够通过配置来产生复杂且可控的振荡输运行为，且可以证明这对小的机器人器件是非常有用的。我们测量了原质团的提升力，并证实了外部施加的光照刺激如何能够影响原生质输运。通过耦合原生质的振荡，我们给出了一种典型汽车机制来驱动 Braitenberg 汽车的轮子，并使用光刺激来影响转向机制。为了研究从这种简单的组成部分如何产生复杂行为，我们提出了一种基于粒子的多头绒泡菌模型，它能够从简单的局部相互作用来自发地产生复杂的振荡模式，它根据驱动行为的起源和控制来分布，具有模式自适应性，经得起外部影响，具有应对环境损害的稳健性，所以我们将这种生物看作是一种虚拟智能材料。我们证实了其可控运动的不同形式，包括线性运动、往复运动、旋转运动、螺旋式运动以及似变形虫的运动。通过模拟的化学吸引力（拉力）和模拟的光驱动（推力）来施加机器人运动的外部控制。通过将其集体分割为两个独立的实体以及将两个分立的实体熔合为单个器件来证实集体的无定形和分布式特性，从而使其能够遍历困难或者分立的路径。我们通过检查的方式得出：未来的机器人器件能够使用智能材料的物理实例来开发。

1 介绍

虽然微加工技术的最新进展使得制造小型机械装置成为可能，但这仍

然需要一种能量转换手段来将燃料供应转换为可用的原动力。在尺寸上减小传统发动机和变速器的设计虽然是一种可能的方法,但这样做会引入诸如摩擦^[1]、发热^[2]以及更一般的小型化问题^[3],这些问题可能与较大尺度上观察的问题不同,或者会加重较大尺度上观察到的问题。同时,小型发动机仍然需要复杂的发动机设计、控制和装配,包括保养和维修(但是,微制造的其中一个目标在于所预测的最小制造成本上,这时的维修经济性方面不必考虑)。

最近,人们从生物中寻找解决这种问题方法的灵感,以便为将能量转换为原动力提供转换方法,研究实例有细菌^[4]和真核生物^[5]的鞭毛运动、用于微观混合^[6]和输运^[7]的纤毛输运、蠕动推进^[8,9]、变形虫运动^[10]以及集体的质量输运^[11]等。生物启发的机械装置的吸引力在于它们由简单且丰富的材料组成(在它们的最低层次上),且表现出惊人的冗余、容错和自修复能力。然而,尽管上述机械装置技术优雅,而且能够得到惊人的生物自组装产品,但其组件的内部结构似乎与非生物机器人一样复杂,这些组件具有某些机制,比如细菌鞭毛马达系统。通过考虑更加简单的生物结构同样为开发生物启发机器带来了进步,这些简单的生物结构横跨非生命物理材料和生物体的边界,它们包括生物纤维膜^[12]、在网络上的脂质自组装^[13]、伪足状膜扩展^[14]以及基本的趋化反应^[15]。通过研究那些被称作“半生物”材料的结构和功能,已经使一些工程和生物见解变得可用,但从这种微小的实例中观察到的复杂行为产生了关于下限的问题,这对明显智能行为的出现很有必要。

尤其令人感兴趣的是那些能够表现出振荡状态的材料,因为如果与合适的推动机构进行耦合,这种材料中两个或多个状态间周期性的转换能够提供不同的行为和推动力,由此产生的输运可能会相对简单,比如鞭毛和纤毛运动^[16],或者像中枢模式发生器的神经组装产生的模式那样复杂^[17]。当振荡状态与激励的本地通信波相结合,且将激励与推进机构耦合时,同样也可以产生运动。现已经证明,反应扩散现象在这种发生中是有用的,因为振荡状态的出现可以是一种自组织且稳健的过程,而且同样具有行波现象的特征。反应扩散方法用于机器人,包括使用传播波进行机器人控制和导航^[18]、对象的操纵和输运^[19],以及为了向前移动而在凝胶状材料内进行的振荡波输运^[20]。

生物(完整生命系统)和半生物(由生命系统产生的材料)方法都能够为小型机械装置提供有价值的见解和技术,而对于一个生物机器,理想的假定候选人将会是一种能够进行复杂传感集成、能够运动并能够适应

生物体的机体。而它同样由相对简单的材料组成，这些材料易于理解且其特性容易控制。

我们推荐一种黏菌有机体——真实的黏菌多头绒泡菌，它是一种合适的候选机体并能够满足以上两种标准，即它是一种复杂的生物体，而且由相对简单的材料组成。多头绒泡菌是一种体形较大的单细胞生物体，它是自然原动力的一种具有吸引力的候选生物介质，因为在其生命周期的原质团阶段，其基本的物理机制是振荡收缩活动的自组织系统，这一振荡收缩活动可用于其内部输运网络中的泵和养分分布中。这种生物体的不寻常之处在于，振荡的控制分布在整个几乎均质的介质中，并且高度冗余，没有关键或者独特的组成部分。

多头绒泡菌的原质团是一种无定形的物质，典型状态为胶状，且在外观上平整，大小可以从微观尺度到几个平方米。原质团是一种单细胞合胞体，由反复的核分裂形成，并由在两个物理阶段中共同发生的海绵状肌动蛋白-肌球蛋白网络组成。凝胶相是一种致密基质，它在细胞内化学物质变化的浓度的影响下进行自发的收缩和舒张。而溶胶相是一种原生质液，它由凝胶基质内的振荡收缩所产生的力通过原质团来输运。凝胶相和溶胶相之间具有复杂的相互作用，而且当压力、温度、湿度和本地输运发生变化时，两种相都能够在每一种形式中变化。这样就可以将多头绒泡菌的内部结构看作是一种能够产生传感和驱动行为的复杂功能材料。实际上，关于多头绒泡菌原质团内两种复杂的相互作用和其“材料”特性提供的丰富的计算特性，人们已经将其描述为一种膜结合反应-扩散系统。

多头绒泡菌在其自然栖息地（阴暗和潮湿的森林环境）内利用这种计算材料的特性来向前延伸以达到营养源。它会为在其他生物体上发现的细菌提供养分，在调整其机体前积极地增长以形成输运营养物质至其他原质团部分的原生质静脉结构后，伸长其无定形体包住并消化其食物。一个原质团可以分割为两个独立的功能性原质团，或者相反，两个分立的原质团也可以融合并成为单个原质团体。这种能力能够独立提供一种复杂、分布式且丰富的传感和控制机制，最近引起了人们对其计算能力的火热研究。Nakagaki 等人最开始着手研究，他们发现如果将独立的原质团片段融合，就能够通过寻找两个食物源之间的最短连接路径来求解迷宫问题^[22]。原质团计算能力的其他实例包括将其作为一种空间表示的非传统计算机，适合于接近图的近似^[23]、最短路径和无碰撞自由程问题^[24]、平面的分割^[25]、车辆路径^[26]、城市路径规划近似^[27,28]，以及作为一种空间表示的通用计算机^[29]。

从机器人的角度看,先前的研究已经证明,多头绒泡菌原质团对其生存环境中变换条件的适应性,可被看作是原型微型机械操纵系统,能够进行简单且可编程的机器人运动,包括对小型物体的操纵(推或拉)^[30],并在生物/机械混合方法中作为导引机制。其中原质团对光照射的响应可为机器人系统提供反馈控制^[31]。同样也证实了多头绒泡菌启发的方法对使用无定形运动机器人的可用性,这些运动由一系列流体耦合的振荡器产生^[10]。

在传统的工程技术中,动力源及其分布和控制通常是分开的。比如,发动机功率的产生和其通过驱动系统的有用分布是由不同的(尽管是互联的)控制系统控制的。此外,这些系统经过精心设计来保证在正确的时间和特定的范围内施加力。在多头绒泡菌原质团中,这些力(即振荡行为的出现)自发地产生,而且在力的产生和其分布的控制之间没有区别。已经证明,力的产生模式(振荡行为的出现)受到原质团形状的影响,而且该形状又反过来受到振荡行为的影响^[32]。所以有可能通过将原质团限制在一个腔体环境内来在一定程度上控制其振荡的模式,以此来利用其振荡行为的模型特定方面。

在本章中,我们将讨论使用多头绒泡菌作为类发动机和输运机械装置中物理力的自发产生和分布的一种候选机体和材料。本章的布局为:在第2节中我们将给出那些证实多头绒泡菌原质团能够产生可测且外部可控的提升力的实验结果,使用一种哑铃状图案设计,从振荡动力学中证实了其复杂的相位关系,并设计了一种机械装置样机,在该样机中使用多头绒泡菌原质团振荡的动力输出来驱动模拟 Braitenberg 汽车的车轮,使用外部光刺激来使汽车转向。在实验结果的基础上,我们在第3节中研究了一种虚拟材料计算模型中振荡输运的出现,该虚拟材料由粒子集体组成,就像原质团一样,粒子集体中的振荡现象由简单且局部的相互作用产生。以这一新的行为作为我们的基本点,我们研究了在有约束和无约束的环境中原质团图案化对运动模式的影响,这些运动模式由振荡波组成。在第4节中我们证实了一系列的输运类型(线性、旋转、往复和螺旋式)和耦合方法。我们同样考虑了那些具有自发无定形运动特性的材料中更小的孤立“斑点”,研究了在其中虚拟“斑点”可通过外部推力(模拟光照射)和吸引力(通过引诱剂的沉淀)来导引的机械装置。在第5节中总结了实验和理论发现,并提出了未来的研究方向。通过该研究,小型输运器件可由那些具有从简单部件间的相互作用产生新特性的材料来构建。

2 实验

本节,我们实验研究多头绒泡菌发动机实现的可能性。多头绒泡菌原质团因其细胞体内快速的原生质输运流而广为人知,细胞生物学中对细胞原动力已经进行了或长达 50 年的广泛研究(参考文献[33, 34, 35])。原生质输运流的产生机制基于肌动蛋白的聚合或解聚循环,这一循环由钙离子来调节,每 30 s 切换一次^[36]。这种周期性的循环控制原生质输运流的方向,从而导致整个细胞表现出节奏性的细胞厚度变化^[34]。多头绒泡菌原质团原生质输运流的流速可达 1 mm/s,而其他生物体,比如植物和变形虫细胞,它们的原生质输运流的流速约为几十微米每秒^[37]。这是迄今为止发现的最快的原生质输运流,这种快速性与其周期性相结合,使得多头绒泡菌成为小型生物器件的理想部件,比如驱动器和输运器。

为了探索使用多头绒泡菌细胞作为动力源的可能性,需要知道:A. 多头绒泡菌原质团能够产生多大的力;B. 对这个力如何进行外部操纵。在讨论这两点之前,我们首先来讨论多头绒泡菌原质团中细胞形状和收缩振荡节奏的特性。

2.1 细胞形状和振荡模式

作者先前研究了位于琼脂凝胶上的微小圆井内细胞的周期性节律的产生³⁸,当用显微镜观察时,发现放置于井内的一块多头绒泡菌细胞由更小的多块粒状原生质组成,每一块原生质都有可能成为一个黏菌细胞。这些小颗粒在移植后大约 10 分钟就会开始收缩,而且相邻的颗粒逐渐融合在一起以保持与收缩节律同步,它们最终融合为一个多头绒泡菌原质团并表现出几种类型的同步振荡节律,比如原质团的双向往返流(见图 1(a))和顺时针或逆时针旋转流(见图 1(b))。关于多头绒泡菌原质团中振荡产生的最值得注意的是其“大小不变”特性:即使细胞尺寸变大(井的尺寸变大),整个细胞也会在一定时间段内完全同步。我们测试了直径为 1.5 mm、3.0 mm、4.5 mm、6.0 mm 和 7.5 mm 的井,在所有的情况中,多头绒泡菌细胞都会在约 70 min 内完全同步³⁸。换句话说,不管细胞变得多大,颗粒“群”都能够在一个固定时间内自组织为一个同步的振荡节律。这一结果表明,生物体善于调节其内部结构以保持其自身为单个细胞,即使在体尺寸变化时,它都能够使用一种分布式计算型控制来恢复其同步性。

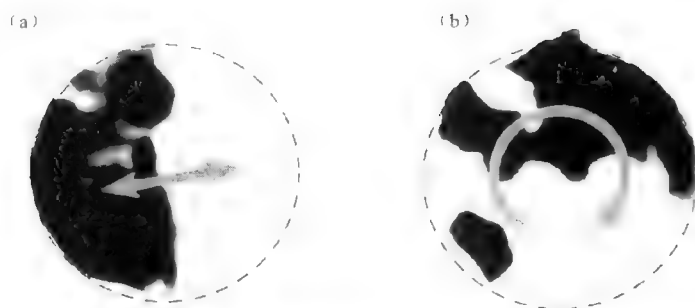


图1 单个细胞中多头绒泡菌原质团的振荡模式。图(a)为双向往返振荡；图(b)为顺时针旋转波。黑色和白色区域分别表示厚度增大和减小

尽管井中的细胞确实表现出振荡特性，而且有可能开发为动力源，这种单井设计也并不适合于多头绒泡菌引擎。在下一节中我们将给出，如果使用井中的整个原质团对另一个物体施加力，细胞总的位移（厚度变化）将非常重要；而对于单个井的情况，总位移会被抵消。例如：如果一个细胞表现出双向振荡（见图1(a)），细胞中一半的厚度增加，而另一半的厚度会减小，从而导致总位移几乎为零。这一事实促使我们去设计一种哑铃形状，在该形状中使用一个狭窄的通道连接两个圆形井（参见图4(a)），这种设计最初由 Takamatsu 等人^[39]提出。当连接通道的宽度为 0.4 mm 时，能够观察到两井间厚度的反相位振荡^[40]，这就意味着细胞的原质团流入和流出井，这样一个井中的厚度位移就不会抵消。

在下一节中，我们采用哑铃形设计，并通过疏水结构保持细胞形状。由于原质团喜欢潮湿区域胜于干燥区域，所以它们停留在结构内并长时间保持其形状（假设细胞的湿度在一个合适的范围内）。下面实验中使用的多头绒泡菌细胞是在 1.5% 的琼脂凝胶中培养的，琼脂凝胶位于设定温度为 26 ℃ 的恒温箱（Lucky Reptile Herp Nursery II Incubator, Net Pet Shop, 英国）内，并每天用燕麦片喂食一次或两次，在实验前至少使其挨饿 12 个小时。

2.2 多头绒泡菌原质团产生的力

本小节研究多头绒泡菌收缩性细胞振荡所产生的力的大小，我们通过在原质团上施加某种重量来估测这个力。特别地，我们在哑铃形原质团的两个井的其中一个上面放置水（见图2(a)），通过改变水的高度来控制施加给细胞的载荷。

哑铃形原质团准备如下：首先，将小块的多头绒泡菌从大的培养箱中取出，并将其置于一个薄的印制电路板（PCB，去除所有铜涂覆层）的哑铃状井中。然后，将它们放置在一个 1.5% 的琼脂凝胶上，并在黑暗环境中至少保持 2 h，这样多头绒泡菌细胞将融合为一个细胞。在细胞融合后，将细胞核 PCB 板用树脂玻璃（PG）和一块 PDMS 块夹紧在一起，如图 2（a）所示。将一个玻璃管（GT）粘接在树脂玻璃的顶部，并在其中充满一定高度的去离子水（DIW），玻璃管的内径与原质团井的直径相同。用一个湿的玻璃烧杯盖住整个装置以防止玻璃管中的水蒸发，并将整个装置置于三维微平台上（见图 2（b））。通过从显微镜中观察其大小，并每 20 min 记录一次水表面的位移。

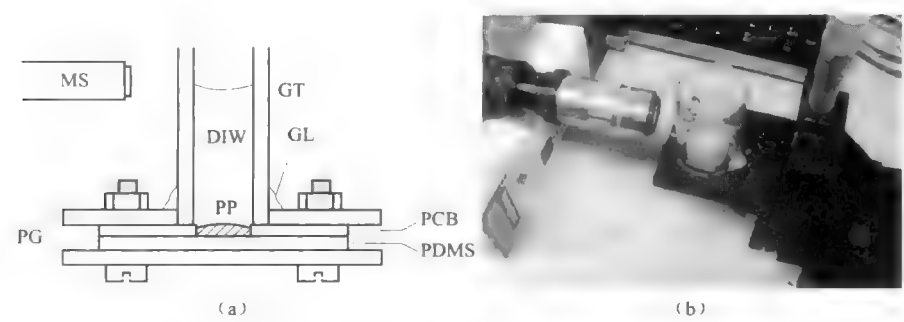


图 2 图（a）为原质团力测量装置的示意图。MS：显微镜；GT：玻璃管；DIW：去离子水；GL：胶；PP：多头绒泡菌原质团；PG：树脂玻璃；PCB：印制电路板；PDMS：聚二甲基硅氧烷硅橡胶；图（b）为装置的照片

图 3（a）给出了水高度为 100 mm 情况时表面位移实验的一个结果。我们分别测试了水高度为 40 mm，60 mm，80 mm 和 100 mm 的情况（分别对应质量 71 mg，106 mg，141 mg 和 177 mg）。在所有的实验情况中，水表面的高度由于底部原质团厚度的振荡而周期性地振荡，振荡周期约为 100 s。在许多情况下，水的高度在 20 min 的实验中会稍微地减小（10 ~ 40 μm ），这可能是因为多头绒泡菌细胞稍微溢出至没有连接盛水玻璃管的井的侧壁引起的。水表面的最大位移根据探测振荡的峰值和底部来估测（在图 3（a）中用“*”号标志），并用振荡的底部至下一个峰值的差来计算。图 3（b）总结了多种水面高度对应的最大位移，当水面高度变大时，位移会单调减小。将这一结果外推，可得到哑铃形多头绒泡菌原质团能够承受的最大水面高度为 140 mm，它能够举起约 250 mg 载荷的重量。

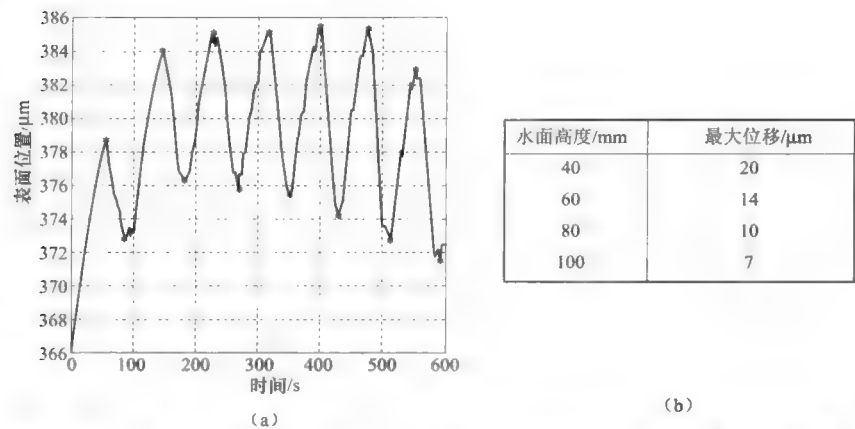


图3 图(a)显示水面高度为100 mm时水面位移的时间过程,图中给出了其中前10分钟的情况;图(b)显示不同水面高度对应的最大水面位移,位移随水面高度的增大而单调减小

水面高度为100 mm时,原质团所做的功可计算为 $W = 0.75^2 \times \pi \times 100 \times \rho \times g \times 0.007 \approx 12.1$ (mJ),其中 ρ 为水的密度(1 mg/mm^3), g 为重力加速度(9.8 m/s^2)。假设厚度的变化速度恒定,细胞的功率可估算为 $P = W/T = 12.1/50 \approx 0.24$ (mW)。

但是,在微观尺度上需要注意的是一些因素将变得非常重要,而它们在宏观尺度上不必考虑。例如:与细胞产生的力相比,摩擦将变得相对较大,这样,为了有效使用该力,必须注意的一些事情是润滑剂的选择以及截止阀的设计。然而,值得注意的是,一个重量只有约5 mg的微小细胞,能够举起比其自身重量大36倍的载荷。

2.3 多头绒泡菌引擎的操纵控制

有多种方法可以对多头绒泡菌的振荡进行外部激励,比如光^[41]、温度^[42]和电激励^[43]。与其他方法相比,人们最常使用的是光激励,因为它可以通过简单地打开或关闭光线来很容易地引入或去除。众所周知的是,当将原质团的一个局部区域暴露在白光中时,局部的厚度振荡频率就会减小^[44],所以我们采用白光作为多头绒泡菌引擎操纵的外部控制器。

为了证实白光是否影响哑铃形细胞的振荡节奏,我们进行如下实验:使用一种透明薄板,在1.5%的琼脂凝胶上构建哑铃形多头绒泡菌原质团(见图4(a)),用1/16 in的手动钻孔机在膜上切出哑铃形孔,得到直径约1.5 mm的孔,在立体显微镜下使用手术刀切出两孔之间的连接通道。由于原质团喜好潮湿区域而不是干燥区域,所以通过控制湿度使得原质团

保持在膜内（其中琼脂凝胶暴露在外）。将细胞置于显微镜下（Leica Zoom, 2000, 德国）并用波长约 600 nm 的带通滤波光从底部照射（见图 4（b））。这种波长的光不会影响多头绒泡菌的振荡活动^[45]。细胞的厚度用透过细胞的光传输来测量，它与厚度成反比。控制器是一种罩有热缩管的超亮白光 LED 灯，用它来照射两原质团井中的其中一个（见图 4（b）中的虚线圆）。在 PC 机上每 3 s 保存一次细胞的快照图，以便于后续的图像分析。

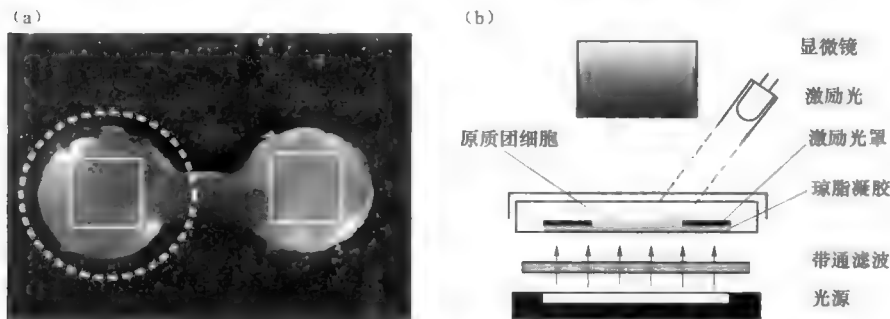


图4 图（a）显示位于 1.5% 琼脂凝胶上的哑铃形原质团。细胞周围的黑色罩由透明薄板制成，虚线表示暴露在白光中的区域，两个实线方形框用来计算细胞的厚度振荡。图（b）为光照实验的示意图。细胞暴露在底部用来监测的带通滤波光中，其中一个井则暴露在顶部用于激励的白光 LED 灯中，细胞保持在培养皿中以保持其恒定的湿度条件（见书后 p. 20 彩图 4）

细胞的厚度计算如下：（1）将每一个记录的快照图从 RGB 转换为灰度图；（2）计算时刻 t 和 $t - \Delta t_1$ 时的图像差异，得到 Δt 时间段内多头绒泡菌原质团的厚度变化，分析中使用 $\Delta t_1 = 7$ ；（3）在每一个井上使用空间范围为 91×91 像素、时间跨度为 15 图像的移动的平均滤波器（见图 4（a）中的实线方框），其作用相当于一个图像平滑滤波器，以减小相机噪声。

图 5 给出了细胞对白光的一种典型反应。在光照打开（图 5 中的前半部分）对应的点之前，绝大多数时间内两个井的振荡在幅度和时间上同步，但一旦有一个井暴露在光照中时（蓝色曲线），它们将变得异相。光照是对细胞的一种反向激励，它在减慢原质团的局部收缩振荡。实际上，在曲线图的后半部分，振荡循环的周期将变长，而未暴露的井的循环周期（红色曲线）仍然与先前相同。细胞对光照的另一个反应是振荡幅度的显著变化。在激励的井中，光照打开（水平虚线表示）后不久幅度就会下降，这是因为细胞试图通过将原生质从激励的井活性吸取至非激励的井而从暴露区域逃离，当去掉白光后，激励井中的振荡回复到原先的周期，而

且两个井中的振荡幅度变得几乎相同（数据未给出）。所以，白光确实会减慢哑铃形多头绒泡菌的振荡，而且使用这种光线激励，细胞能够进行外部操纵。下一节中我们将给出，由多头绒泡菌细胞驱动的激励汽车能够被人工操纵。

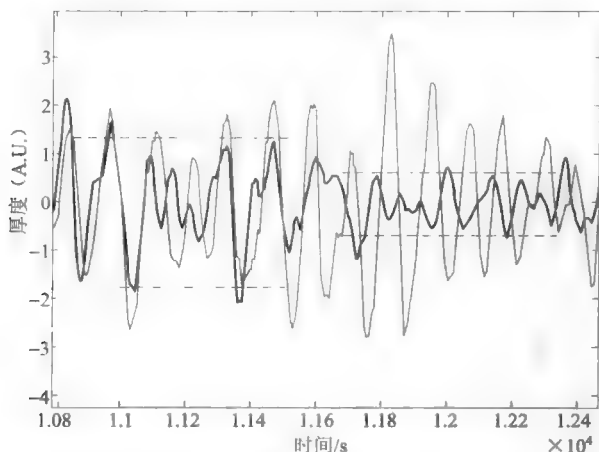


图5 多头绒泡菌原质团对光激励的典型反应。两个井中只有一个暴露在白光中（蓝色线），向下的箭头表示LED灯打开时的点，并一直开启直到曲线末端。光照打开后激励井（蓝色曲线）的振荡周期稍微变长，而未激励井（红色曲线）的振荡周期则未变，激励井中的振荡幅度显著减小而另一个井（水平线）中的振荡幅度则增大（见书后 p. 21 彩图5）

2.4 实验数据驱动的汽车模拟

假设由多头绒泡菌原质团产生的功率全部转换至一个虚拟的微型汽车的驱动轮而没有能量损失，两个井（参见图4（a））中振荡厚度的增加和减小驱动如图6（a）中描述的类Braitenberg汽车⁴⁶⁾的驱动轮。汽车拥有两个由哑铃形多头绒泡菌原质团振荡驱动的车轮，它还有两个光源用来照射细胞的两个井以便操纵汽车（下面描述），两个井与汽车集成在一起。厚度振荡有几个输出可用来驱动车轮，例如：厚度幅度、振荡频率，以及两个井振荡的相位差。我们在这里使用厚度幅度来进行汽车控制，即厚度振荡推动假设的活塞并使曲轴旋转来改变其中一个车轮的速度。车轮以一个固定的速度旋转，细胞的厚度振荡增大了依赖于幅度的速度。多头绒泡菌驱动汽车的运动可描述为（见图6（b））：

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + |r_1| \sin(\theta + \alpha) + |r_2| \sin(\theta - \alpha) \\ y(t+1) = y(t) + |r_1| \cos(\theta + \alpha) + |r_2| \cos(\theta - \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x(t)$ 和 $y(t)$ 为在时刻 t 汽车的位置； r_1 和 r_2 为在某一周期（这种情况下为 21 s）内左侧和右侧井中细胞位移的厚度； α 为用来确定厚度位移对车轮运行速度变化贡献的参数， α 的值越大，被加速的车轮越多。这样， α 值越大，汽车的运动方向对两个井振荡的幅度差就越敏感（即如果 $\|r_1\| - \|r_2\|$ 较大，汽车就会左转或者右转）。

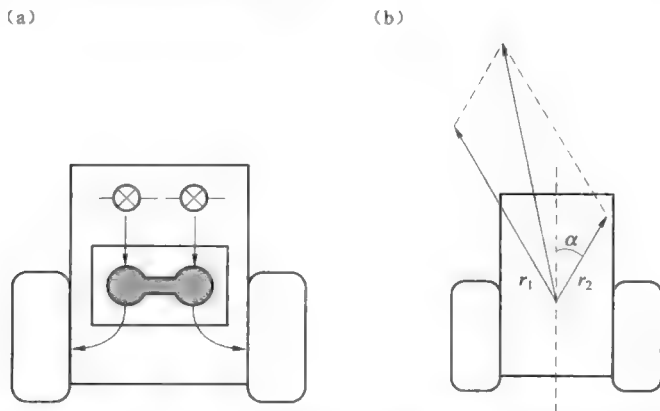


图6 图（a）为多头绒泡菌引擎驱动汽车的示意图。细胞的振荡幅度确定汽车车轮的旋转速度，光照多头绒泡菌原质团的每一个井用来使汽车转向。图（b）显示的是多头绒泡菌驱动模拟汽车的运动。汽车的运动方向可用矢量相加表示（式（1））

图7 给出了由实验数据驱动的模拟汽车的轨迹。汽车从原点出发（0，0），在没有光输入时径直向前运动（黑色线）。当哑铃形细胞左侧的井接

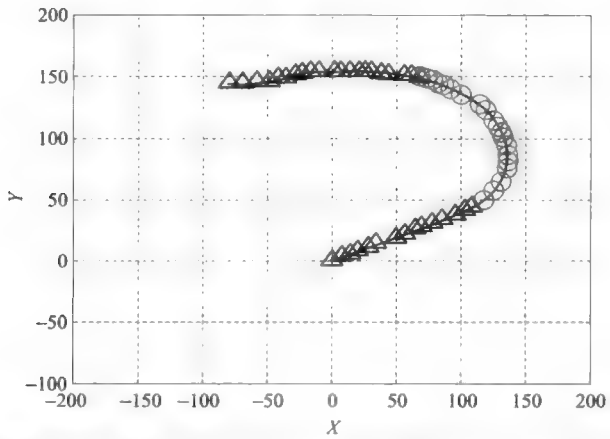


图7 由实验数据驱动的模拟汽车的轨迹。仿真中使用 $\alpha = \pi/720$ ，汽车从原点（0，0）开始，黑线表示当没有光照射井时的时间段，红色线表示右侧井被光线照射时的时间段，每 150 s 会周期性地绘制一次三角和圆形（见书后 p. 21 彩图 7）

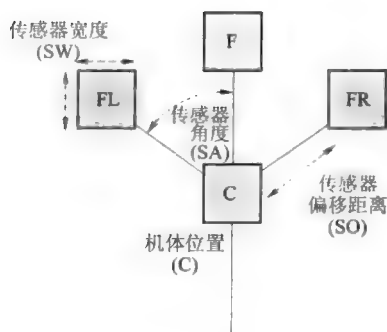
受光激励时,汽车左转(红色线)。而当光照关闭时,汽车将再次直线前进。这可以根据多头绒泡菌的特性解释如下:当对细胞没有激励时,两个井以相同的幅度振荡(参见图5),它们以相同的速度驱动车轮,所以汽车直线运动;而另一方面,就像前一节中所描述的,当光照打开时,激励井的振荡幅度显著减小,而另一个井中的振荡幅度增大,这是因为细胞移出光照区域并向非光照井迁移,从而减慢了由激励井驱动的左侧车轮并加速了右侧车轮,导致右侧光照打开时汽车左转。而光照关闭后又会驱动车轮直线运动,因为当光照去掉后两个井中的振荡恢复至几乎相同的水平。

3 基于粒子模型中振荡运输现象的出现

由于多头绒泡菌相对缓慢的发展和在所选机器人任务(毕竟原质团只关注生存和死亡,具有满意的外部应用实验任务)方面其“性能”的自然变异性,它有利于开发计算建模方法,这将有利于对分布式机器人控制的研究。这种建模方法使得我们能够从简单的组件探索复杂振荡行为的出现并评估其应用到机器人任务的可能性。

为了研究所出现的振荡显现对于类引擎运输的用处,我们在文献[47]中应用了一种粒子模型的扩展,它用来产生动态的自然运输网络。在这种方法中,原质团由大量的移动粒子组成,这些粒子具有非常简单的行为,并位于一个2D扩散环境中。用一个离散的2D网格(其中将环境场景映射为2D图像的灰度值)存储粒子位置和局部因子的浓度,我们通常将该局部因子称为趋化因子。“趋化因子”系数实际上表示原质团内溶胶的假设通量,自由的粒子运动表示原质团的溶胶相,粒子位置表示原质团固定的凝胶结构(即全局图案) 粒子独立作用而且粒子群的迭代随机地进行,以避免从有序排列中引入任何人为因素 将粒子行为分为两个不同的阶段——传感阶段和动力阶段。在传感阶段,粒子使用三个正向偏置的传感器采集它们的局部环境,这些传感器与前向位置的夹角(传感器角度参数,SA)和距离(传感器偏移,SO)可进行参数调整(见图8(a)),偏移传感器代表了运输网络和原质团内重叠且相互缠绕的细丝,这些细丝分别用来产生传感输入和运动的局部耦合(见图8(c)和图8(d))。

SO距离以像素为单位,对于强烈耦合的发生则需要3个像素的最小距离 在传感阶段,每一个粒子改变其方向以转向(通过旋转角参数,RA)最强的局部趋化源(见图8(b))。在传感阶段后,每一个粒子将执行动力阶段并试图在其当前的方向($0^\circ \sim 360^\circ$)上通过单个向前的像素向前移

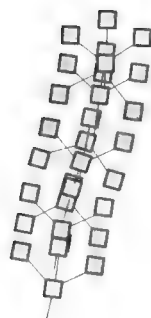


(a)

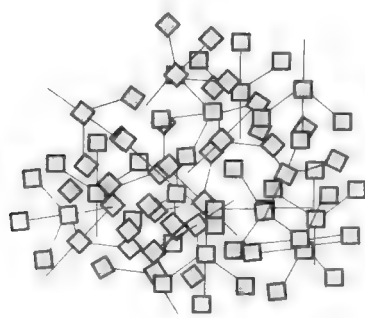
[传感阶段]

- 采集趋化因子映射值
- if ($F > FL$) && ($F > FR$)
 - 继续面向同一个方向
- Else if ($F < FL$) && ($F < FR$)
 - 根据RA向FL和FR较大的方向旋转
- Else if ($FL < FR$)
 - 由RA向右旋转
- Else if ($FR < FL$)
 - 由RA向左旋转
- Else
 - 继续面向同一个方向

(b)



(c)



(d)

图8 机体粒子图案、算法和聚集类型 (见书后 p. 22 彩图 8)

动。每一个网格点只能存储一个粒子，只有在成功向前移动的事件中，那些关键粒子才会在网格中放置趋化物 (见图 9 (a))。如果下一个被选的点已经被另一个粒子占据，默认 (非振荡) 行为将放弃移动，仍然待在当前位置上，并选择一个新的随机方向 (见图 9 (b))。通过一个简单的 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 平均过滤内核来实现集体趋化信号的扩散，该过滤内核具有一阻尼参数 (设置为 0.07) 来限制趋化物的扩散距离。

低层次粒子相互作用会形成复杂的构型，粒子群自发地形成动态输运网络和准物理的自然特性，这些网络表现出复杂的进化，自然特性包括网络缺陷的关闭、明显的表面张力效应和网络最小化。文献 [48] 中给出了对可能的图形化参数的探讨。尽管粒子模型能够复制多头绒泡菌原质团内发现的许多基于行为的网络，比如自发的网络形成、往返流和网络最小化，但是其默认行为不具有生物体中发现的振荡现象和惯性冲击运动。这是因为当一个粒子被阻塞 (即当选择了一个已经被占据的点) 时，默认动

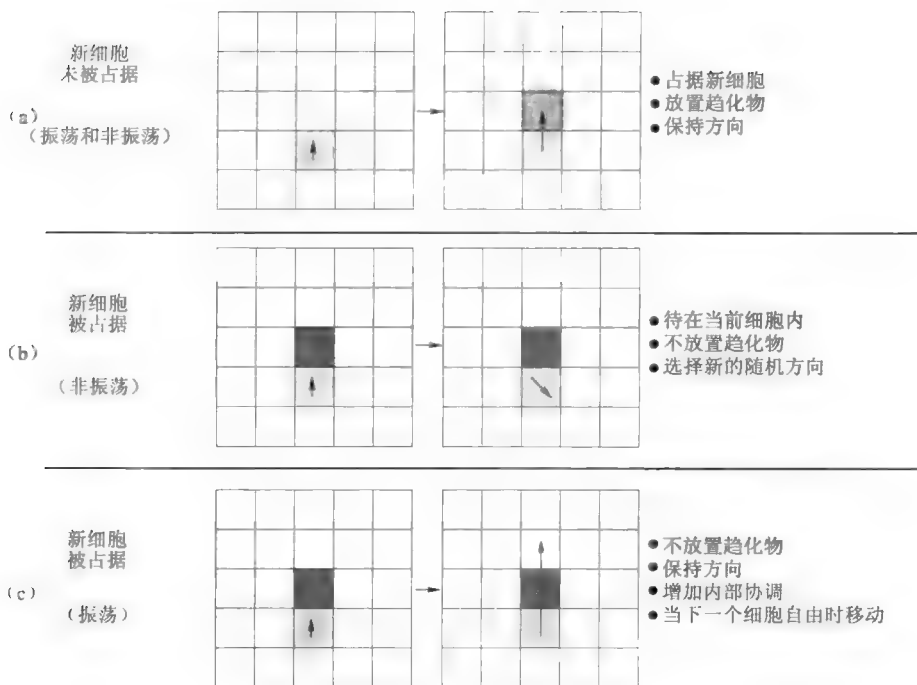


图9 在非振荡和振荡条件下的粒子动力行为

作将会随机选择一个新的方向，导致非常易变的流体网络进化，类似于肥皂膜的松弛演化和文献 [13] 中发现的脂质纳米管网络。

在原质团中发现的振荡现象被认为与原质团内肌动蛋白、肌球蛋白和细胞骨架丝结构的自发组装/拆解相关联，这用来在原质团的原生质内产生收缩力。由此导致的凝胶相和溶胶相间的转换阻碍（凝胶相）和促进（溶胶相）原质团内细胞质流动，用粒子模型模拟这种行为只需要对动力阶段进行简单改变即可。与向前移动阻塞时随机选择一个新的方向不同，粒子增量分别进行其内部协调，直到直接位于粒子前方最近的细胞是自由的。当一个细胞变得自由时，粒子就会占据这个新的细胞并将趋化物放置于网格内（见图9(c)）。这种行为的效果是为了去掉粒子群默认运动的流动性，其结果是一个冲击惯性运动模式，并依赖于粒子群密度（粒子群密度指明了群内自由运动的初始数量）。惯性效应的强度可由一个参数（ pID ）来抑制，这一参数设置了一个粒子复位其内部位置坐标的概率，较低的值提供较强的惯性运动。

当这种动力行为中简单的变化开始时，能够观察到冲击运动，而且趋化通量的振荡区域自发地出现在虚拟原质团内，这些虚拟原质团表现出的

特征行为有：粒子（凝胶相）的暂时阻塞会陷入突然的局部运动（溶胶相），而且反之亦然。振荡区域自身会经历复杂的演化，包括竞争、相变和夹带，下面我们使用这些动力学研究产生可用的规律性振荡模式的可能性，这种规律性振荡可被耦合以提供动力。

3.1 模型设置

模型中振荡行为的出现，与原质团内原生质分布的差异和原质团内随后的厚度变化相一致。在一个真实的多头绒泡菌原质团内，原质团膜厚度的变化可用来提供激励（通过静脉网络泵送材料，或者原质团的整体运动）。在原质团的自发收缩和随后的原生质输运至该区域外之间已知一种关系，这样正在经历收缩的区域会变薄（当用光照射时允许更多的光线透过），而远离收缩区的区域由于更多原质团的进入则会变厚（允许少量的光线透过）。在计算模型中，粒子的输运表示材料内原质团的自由通量，通量（大量粒子运动）的增加由补充录像中灰度亮度的增加来表示（<http://uncomp.uwe.ac.uk/jeff/robots.htm>）。粒子整体运动的减弱表示阻塞和缺乏输运，它可以用灰度亮度的减小来表示（因为趋化物的放置只发生在成功向前移动的事件中）。为了在静态图像中清楚起见，将灰度图像进行黑白翻转（深色区域表示较大的通量）。

粒子群的环境为一个 2D 网格，它用一个数字化的图像表示，将图像设置为实验原质团的生境。我们设计了简单的形状，在该形状中限制组成虚拟材料的粒子集体，粒子群在未限制的区域内可自由运动。形状由“壁面”区域、“空置”区域和（有关的）“激励物”区域组成，在“壁面”区域中运动不能发生，在“空置”区域中运动可能发生，而“激励物”区域用来向粒子群提供收缩激励或排斥激励。在每一个实验开始时，粒子群在实验场景中的整个空闲空间内随机分布，而且所有的粒子具有随机的初始方向，使用固定的粒子尺寸（本报告中我们不讨论自适应群体规模）。所有可能的自由粒子运动的总数量取决于群体规模，它是空闲空间的函数。在这些结果中如果没有特别指明，我们使用 90% 的占用率，即所有空闲区域中有 90% 被粒子占据。在所有的实验中都有一个振荡行为未被激活的初始周期，这将导致自组织的规律域，当振荡动力行为被激发时，这些规律域会坍塌并开始出现规律振荡模式的小域，随着时间的推移，这些域的凝聚和竞争会引起粒子群被诱导为规律的振荡模式，这一过程会受到粒子传感参数和实验场景形状的影响。

我们使用场景形状来约束振荡行为以确定使用振荡行为来提供有用

“类引擎”输出的可能性。在这一点上我们的意思是，振荡模式应当具有周期性、规律性和可靠性，机械发动机使用同样的方式提供规律且可靠的同步动力模式。

3.2 数据分析

我们从自然的趋化通量模式中采集规律性的帧，通过比较场景不同区域中的灰度水平来分析粒子通量的差异。我们特别关注了振荡行为的可靠启动和行为的特性（例如，周期、密度和耦合效应）。

4 结果

前面的叙述已经表明，当将粒子群限制在一个圆形井内时，它们能够成功复制原质团的行为，从而引起振荡模式的自发产生（在图 10 中进行了总结，所产生模式的类型取决于每一个粒子的传感参数，SA 参数和 RA 参数），而且当 SO 参数增大时，还会引起向不同模式的转变（更多信息详见文献 [49]）。在圆形井中，最常观察到的模式为旋转模式。当进一步增

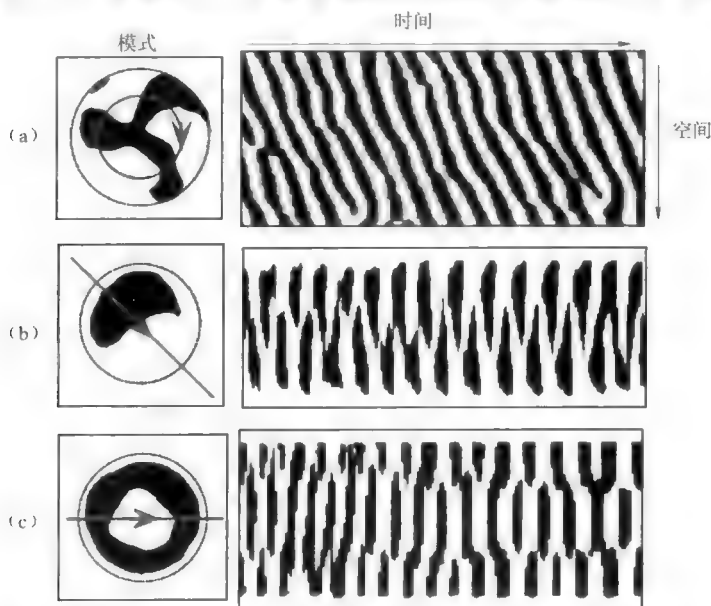


图 10 一个圆形井内约束的多头绒泡菌的粒子模型中观察到的振荡模式。图形左侧：具有空间时间曲线叠加轨迹的模式快照图。图形右侧：振荡模式的空间时间曲线。图（a）为旋转模式；图（b）为双向往返模式；图（c）为环形模式

加 SO 相互作用距离时，能够观察到双向往返振荡，随后能够观察到一个环形模式。在场景的圆形限制形状和所产生的模式类型间具有一个关系式。

我们推测模式类型变化（随着时间的推移，这在实际的原质团中也观察得到）的原因是，对于圆形井，振荡区域间的相互作用规模变得太大，相互作用受到限制，并且形成一个新的模式，它能够很好地“适应”井的限制。这就表明，这些自发产生的本证可通过对应环境的结构变化以某种方式形成。为了进一步研究振荡模式类型和环境条件之间的关系式，我们研究了模仿虚拟场景的不同方法，以便于评估振荡模式类型和模式演化之间的区别。

4.1 开放式模式中的输运运动

我们用一个简单的管形模仿环境，管的两端通过调用粒子的周期性边界条件缠绕在环境的边缘，壁面边界将粒子群限制在管内，如图 11 为其快照图和空间 - 时间曲线。空间 - 时间曲线是通过沿图像的宽度方向上在下管段的正中间采集每一个像素，并根据这些采样值组合一个图像（像素亮度与趋化物痕迹的浓度有关）而记录的。在使用非振荡动力条件一小段时间后（见空间 - 时间曲线的顶部），振荡动力行为进行初始化。小的区域表示所出现的趋化通量的不同浓度（见图 11（a）），这些通量沿不同方向移动。随着时间的推移，这些区域相互竞争并在数量上逐渐变少（见图 11（b）），直到管最终被分为高通量（自由运动区域）和低通量（阻碍运动的区域）的规则区域。这些区域在单个方向上以规律的方式移动（见图 11（c）和空间 - 时间曲线的下段）。

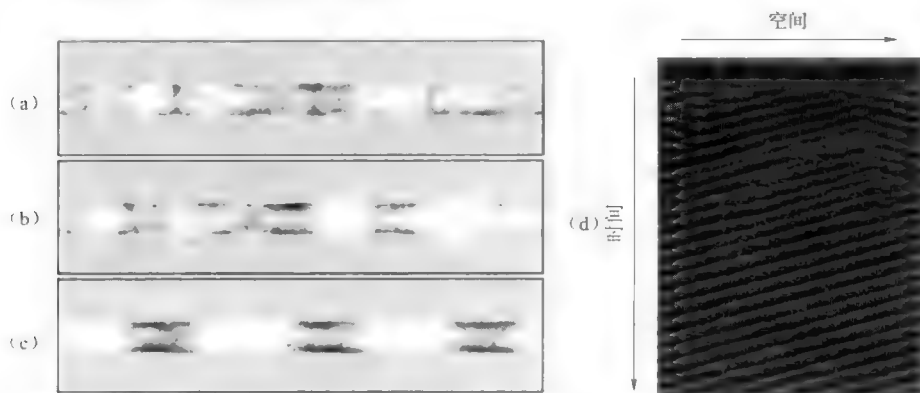


图 11 管形环境中行波输运的出现 左图：在图（a）257、图（b）868 和图（c）990 调度步骤时的快照图。右图：规律性输运出现时的空间 - 时间曲线

由粒子集体行为产生的行波实际上沿着与粒子整体运动相反的方向传播,在如图 12 所示的例子中,行波的方向(见图 12 (b),实线箭头)为从右到左,而粒子的实际运动(见图 12 (a),虚线箭头)趋向于从左到右。由于粒子只能在网格中的空间变得可用时移动,所以空闲空间是向着与粒子运动方向相反的方向移动。而且当与一个相对空闲的空间区域较为接近时,粒子本身会表现出较大的运动可能性(见图 12 (c),还注意到粒子运动趋向于发生在较轻的区域,这些区域指的是具有更多的空闲空间和更大的趋化物通量的区域)。空间本身则是向后移动,因为一个粒子从其当前位置向前移动去占据一个空闲空间,随后会在其前一个位置留下一个新的空闲空间。由于趋化物只能由进行了一次成功运动后的粒子放置,所以趋化物通量是由空闲空间的分布来模仿的,因此波前沿着与粒子运动相反的方向移动。粒子的整体运动同样比行波运动慢很多,如图 12 所示,这表明单个粒子需要大约 8 000 个调度步骤来横越场景的整个宽度,而行波只需要约 400 步,为 20:1 的差异(尽管粒子的前进稍微地受到低数量的空闲空间和与边界区域接触时方向变化所引起的阻力的阻碍)。自组装行波与粒子移动方向相反,与比如交通堵塞^[50]中观察到的向后传播特征相像。

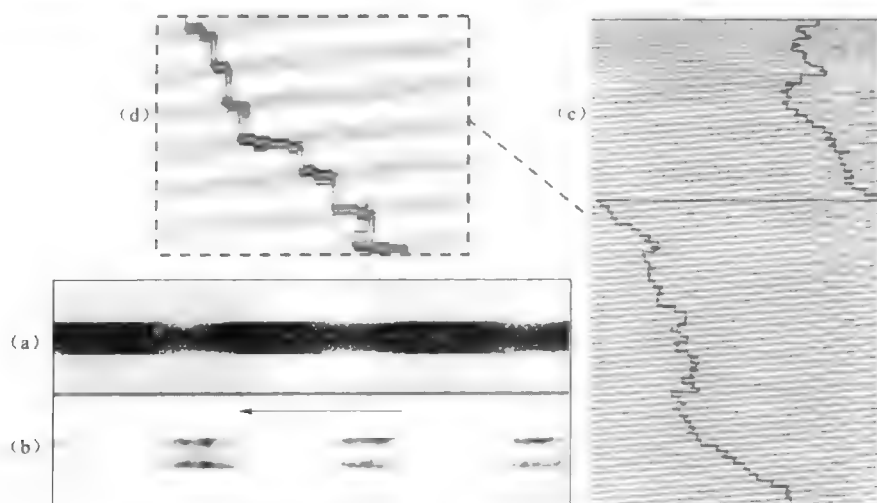


图 12 粒子集体漂移与波传播方向相反。图 (a) 显示粒子位置与示踪粒子(圆圈);图 (b) 显示趋化物波传播;图 (c) 显示示踪粒子位置叠加的空间-时间曲线;图 (d) 表示示踪粒子移动(水平移动)倾向于发生在空闲区域(高的趋化物通量)的放大图(见书后 p. 22 彩图 12)

对粒子定向排列的进一步分析，显示出与行波有关的粒子群的一些意想不到的特性。在实验的开始阶段，粒子群的分布和朝向是随机选择的（见图 13（a）），而且朝左的粒子和朝右的粒子的比例通常等于 50:50（我们将粒子朝向分为“朝左”和“朝右”，这取决于它们的实际方向位于哪一个类别）。当行波出现并稳定后，粒子的分布则会按区域进行分组（见图 13（b）），这与行波中观察到的高的和低的趋化物浓度区域的分布相类似（见图 13（c）），但会有稍微的偏移。每一个区域中的粒子具有相同的排列方向，而且不同区域关于其中粒子的排列交替变化（即区域排列为左、右、左、右等）。实验结束时的最终排列比通常为 53:47（十次运行比率的平均值），大量粒子朝向行波的方向。粒子以与迎面而来的行波相同的速度改变它们的方向排列，但粒子的实际移动远慢于波的速度，而且与波传播的方向相反。

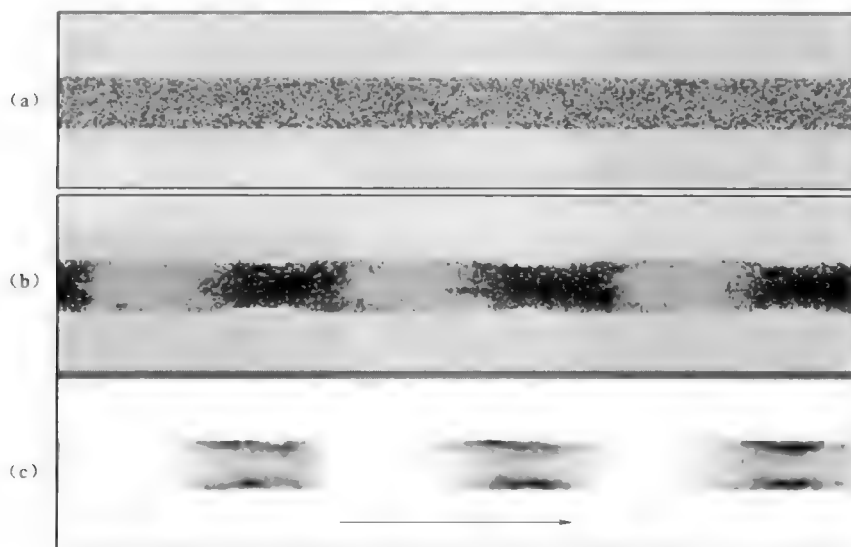


图 13 粒子的集体排列和行波。图（a）显示粒子的初始随机分布和它们的排列；图（b）显示当出现稳定的行波时，粒子成组地分布并具有相似的方向排列：较浅的区域朝右，而较深的区域朝左；图（c）显示行波中的趋化物通量向右移动（见书后 p. 23 彩图 13）

通过模仿环境以去除所有的边界条件并保证周期性边界条件，自然振荡模式自组织为行波（见图 14），但波的各种模式间需要相当长时间的竞争来实现并形成同步行波。同步波出现前时间的增加，可以归因为由环境对其运动约束的缺乏所引起运动的较大的初始自由度。

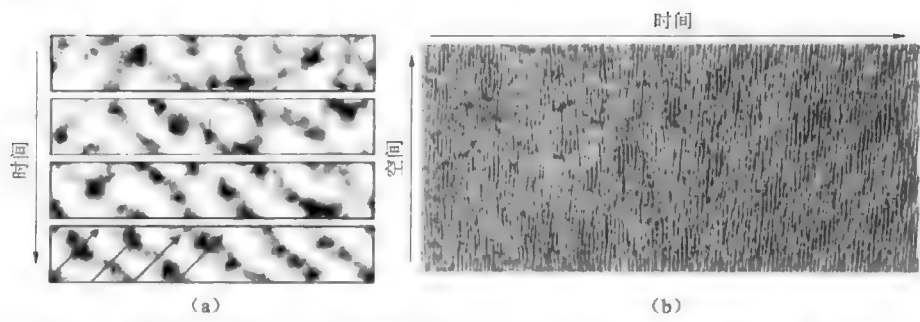


图 14 具有周期性边界条件的无图案的环境中的螺旋运输。图 (a)：具有最终螺旋形运动的波前的竞争和运输的快照图。图 (b)：表示规律性运输发生前较长时间的空间 - 时间曲线

通过去除边界上的运动并代之以将空闲空间模仿为环形结构，实现了行波的旋转运动（见图 15）。同样，由于环境阻碍减少了运动的初始自由度，使得实现同步前的竞争周期变得相对较短（见图 15 (a)，空间 - 时间曲线）。即使在环境中增加非圆形单元和更多的弯曲路径后，环形结构同样能够激起行波运动（见图 15 (b) 和图 15 (c)）。旋转运动的成功初始化表明了产生可靠传送带式运输的可能性。

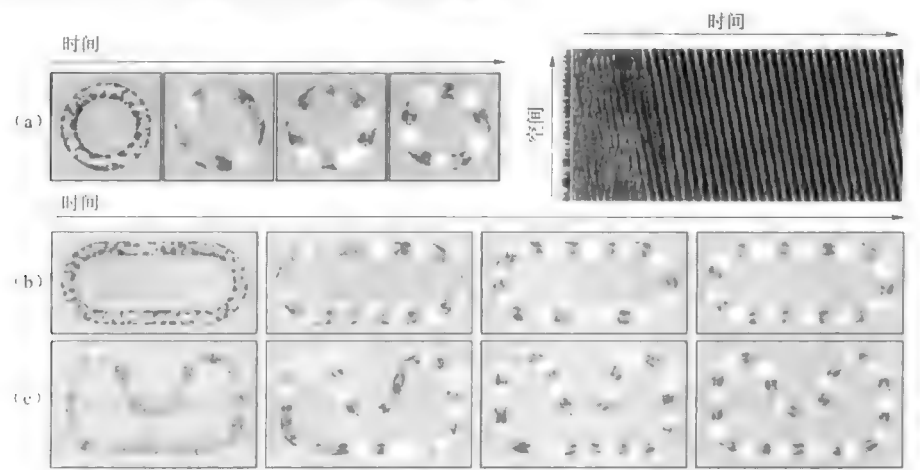


图 15 旋转运动振荡的出现 图 (a) 为旋转运动的出现和表示规律性动力脉冲的空间 - 时间曲线的可视化，空间 - 时间曲线通过在圆的空闲轨道内记录 360 个点来创建。图 (b) 是由圆形和直线区域组合而产生的履带式旋转运动。图 (c) 是由一个更加弯曲的环形结构产生的传送带式运动

通过组合两种环形模式并引入一个暴露于两个独立波前的重叠区域，在 5 000 个调度步骤后，有可能实现从一个旋转“动力”至另一个的脉冲

运输，这一过程模仿了通过流体耦合效应从一个环向另一个环的运动传递和同步（见图 16）。类似于传统的齿轮传动装置，两个相对环的旋转沿相反方向，但与传统的齿轮系不同，这里的“齿”（波前锋）不会重叠。

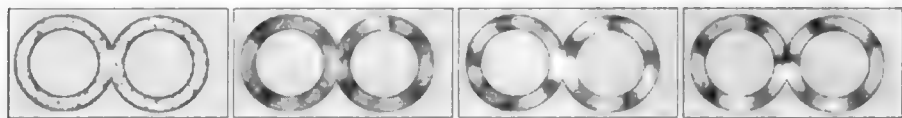


图 16 重叠两个转子模式中齿轮式耦合的出现。图中分别为在第 20, 121, 981, 6 997 个调度步骤上得到的快照

4.2 封闭路径模式中的运输

开放式环形模式中的运输运动较为稳定，因为粒子整体的漂移运动最终与行波同步，在路径内粒子群变得分布得相对均匀，这种分布也不时地受到粒子占有密度的规律性空间变化的打扰。然而，如果使用封闭式路径模式，就不会发生均匀分布，因为路径的两端不能传递粒子运输。这样，随着时间的推移，粒子的漂移会引起在腔体的一端粒子群密度具有变大的趋势。一旦在一端出现了某种不平衡，在这一端空闲空间的数量就会降低，而且粒子会被吸引至具有更多空闲区域的腔体的另一端。就像环形模式一样，腔体内仍然会出现短时间的振荡运输和竞争（见图 17（a）和图 17（b）），但这会被一个二阶振荡抵消，这一二阶振荡会在一个较长的

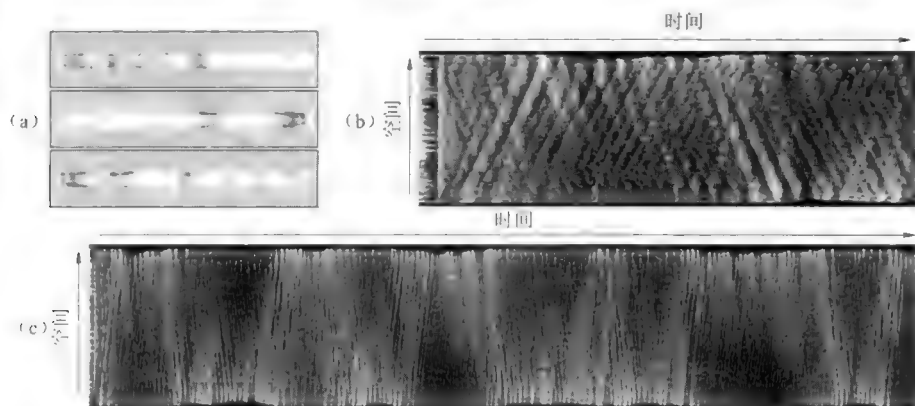


图 17 由封闭式路径环境中粒子的整体漂移引起的复杂二阶振荡。图（a）表示封闭腔体不同端的脉动振荡；图（b）表示振荡行为和振荡域间竞争的初始化的空间 - 时间曲线的初相位；图（c）将二阶振荡表示为从腔体一端至另一端的粒子整体位置振荡的长时间（20 000 步）空间 - 时间曲线。曲线每一侧的深色区域表示二阶振荡期

时间尺度上发生，因为它是由较慢的粒子整体漂移引起的（见图 17（c））。其效果是在输运方向上存在规律性的变化，而且这也表明一种在开放环形系统中如何能够实现方向变化机制的可能性——通过在环形路径中暂时引入一个堵塞物，直到在方向上发生变化。

另一个将集体行为限制在一个区域内的方法，是通过使用强的引诱源来有效地将粒子集体“固定”在适当的位置，而不是通过其边界在物理上将粒子限制在一个区域内。引诱源表示为在每一个调度步骤上投掷到趋化物扩散场中的值，这些源扩散并吸引集体中的单个粒子。通过控制引诱物位置的间距，粒子集体以片状方式保持在适当的位置，这种方式是通过将粒子吸引至源，以及粒子相互吸引至它们自身放置趋化物到扩散场中的位置来实现的（见图 18（a））。

当振荡动力行为被激发时，就会在不同的方向上出现趋化物激励的行波（见图 18（b）），这些波在一种波成为主要波形前有一短时间的竞争（见图 18（c））。

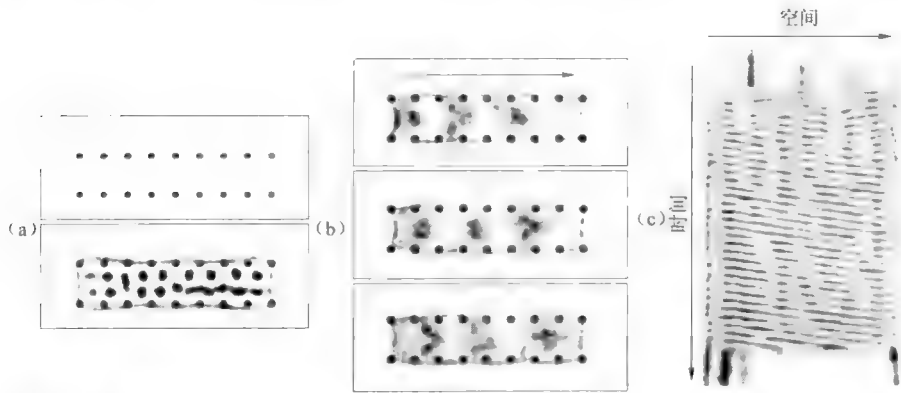


图 18 通过引诱物投掷和行波的出现来限制粒子集体 图（a）显示趋化物源（顶部）的规律性间距投掷限制粒子集体的位置（底部）；图（b）中，当振荡动力行为被激发后，在限制的粒子集体中出现了行波；图（c）中，在一个被固定的粒子集体中出现行波时的空间 - 时间曲线

4.3 无约束粒子集体中的无定形运动

前面集体输运的例子将粒子集体看作是一片虚拟材料，在该虚拟材料上自发产生振荡现象，然后为了输运的目的（泵、电动机、齿轮、传送带等）模拟该材料来控制振荡行波的运动。这与多头绒泡菌原质团的行为一致。原质团作为一种大的片状结构，通过黏合其锚定基板来在原质团内部

使用静水压力输运材料，该静水压力由其肌动蛋白-肌球蛋白网络的自发节奏性振荡产生。但除了这些一般的输运现象外，多头绒泡菌还具有向营养源迁移^[51]、远离危险源^[44]以及使其多毛机体适应复杂环境^[52]的能力。小的多头绒泡菌胚胎甚至能够使整个原质团迁移远离某些环境中的不利条件，比如细菌污染。此外，原质团还由于其其在经受物理损伤后的生存能力而广为人知，一小块切除的原质团能够独立生存，而且单个切块能够融合以形成一个机体。为了扩展汽车模拟，多头绒泡菌不仅代表了其内部机构（动力机制，传递连接），还代表了运动的汽车本身，它代表了一种能够在去除部分部件、引入新的外部部件以及修复损坏部件后仍能运行的汽车。

现在我们开始研究未受约束的微小粒子集体的特性，以便在将它们比作同样大小且独立的原质团片段时评估粒子集体的特性。更小的粒子集体可看作是虚拟材料中的一种一般的无定形“斑点”，而不是看作是一种刚性片状材料。众所周知的是，更小的粒子集体如果不使用振荡动力特性条件，将会像初始输运网络一样压缩为一种均匀的圆形形状（见图 19（a））。非振荡斑点表现出规律性的空缺域（深色区域），而且由非振荡动力条件提供的不固定的粒子运动保证了斑点的内聚性并保持最小的形状，非振荡斑点同样能够在经受外部扰动后迅速复原。当受到外加趋化物源的激励时（见图 19（a），鼠标的位置在第四个图像），由于粒子集体被吸引向激励源而导致的由激励引起的粒子集体变形会在激励去除后恢复，粒子集体回到其最小的形状。

当振荡动力行为初始化后，规则的域会随着粒子运动变得不再无定形而倒塌（见图 19（b）），而且振荡会穿越粒子集体。由于微小的粒子集体不受外加模式的约束，所以振荡会使粒子集体的形状发生畸变。当进一步减小 pID 参数至 0.01 时，对单个粒子运动的流动性进行更强的约束，振荡会变得更强，而且使粒子集体的边界发生显著的畸变（见图 19（c）），大量粒子较大程度的转移引起了粒子集体穿越其环境。通过其他 SA/RA 参数的设置保持粒子集体的内聚性，如果与较低层的传感器作用（SO）距离相结合，就能够引起粒子集体分裂（详见比如使用不同 SA/RA 组合的振荡模式的补充材料）。就像实际原质团的情况一样，粒子集体内振荡活动的模式和粒子集体的整体行为间具有显著的相互作用^[32]，振荡模式部分地决定于粒子集体的尺寸和形状，这些振荡通常以波的形式行进，并穿越粒子集体。行波（本质上为趋化物通量的差异）引起粒子集体内粒子流的变化，而这种变化反过来又会引起粒子集体形状的变化。这样，粒子集体变化后的形状对随后的振荡模式和集体形状具有重复效应。

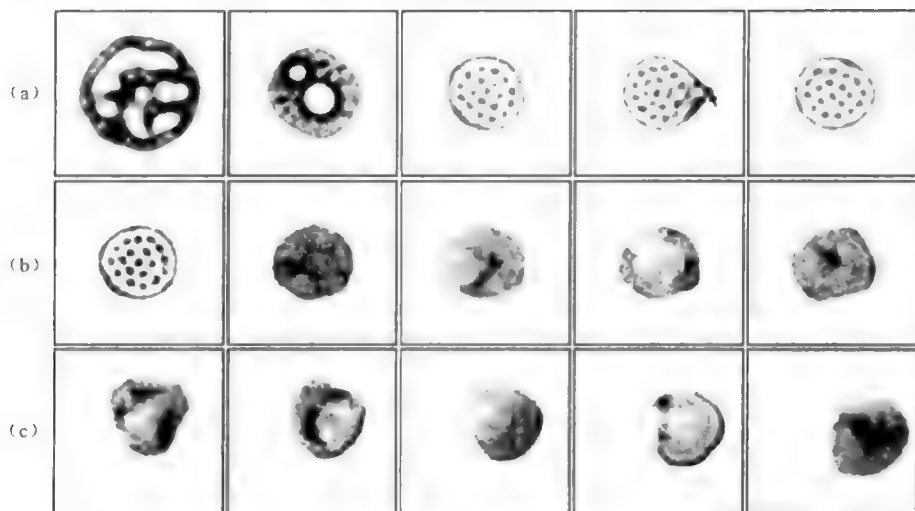


图 19 振荡行为的初始化和无约束粒子集体中的无定形运动。图 (a) 中, 在非振荡行为中斑点材料的收缩表现出空缺域和对变形的可恢复性; 图 (b) 中, 具有规律性空缺域的初始非振荡粒子集体 (左图) 和在 1 950、2 039、2 057、2 086 和 2 122 调度步骤时发生的振荡行为, 粒子总数 9380、SA90、RA45、SO15、pID 0.05, 其他参数与图 (a) 中的一致; 图 (c) 显示 pID 参数减小至 0.01 后得到的更强的振荡, 以及在 4 648, 4 684, 4 720, 4 768 和 4 836 调度步骤上的无定形运动, 所有其他参数与 (a) 中的一致

4.4 一个小斑点片段上的持久运动

图 19 中的无定形运动能够发生, 是因为振荡波使得粒子集体的边界发生畸变, 而且它能够同时保持为一个内聚整体。由于粒子群一直保持其内聚性, 一侧边界的任何畸变都必将引起粒子群分布从相反的方向移动 (因为粒子集体不可压缩而且占据一个固定的区域)。粒子集体的直径 (为组成集体的像素大小的粒子的数量的函数) 必须足够大, 以便振荡出现, 并用以限制其内振荡的模式。

当粒子集体只由相对少量的粒子组成时, 边界的畸变会形成一个近似半圆形的圆顶形状, 而且粒子数量较少导致了粒子集体不能够保持一个完整的圆形。但在低的 pID 值时, 由振荡动力行为产生的持续的向前运动会引起圆顶形状本身随着时间推移而一直保持, 而且小的斑点片段能够向前运动 (见图 20 (a))。片段的运动相对平滑, 而且与较大粒子集体中观察到的脉动运动不同。粒子向半球形轮廓的前方运动, 然后随着时间的推移向侧面运动 (见图 20 (b)), 片段两侧的粒子最后被落下, 只是在中间部位重新进入半球。较高的 pID 值会导致片段方向更加频繁地变化, 因为半

球形前端轮廓不能保持。如果增大粒子群尺寸，单个的双面圆顶形状就不能保持，而且由此导致的运动将变得脉动且混乱。

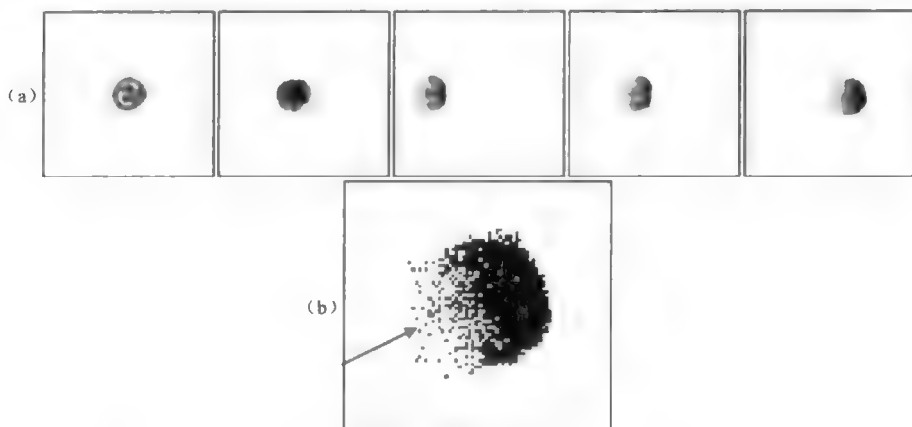


图 20 小的粒子集体中斑点片段的持续向前运动。图 (a) 为无振荡条件、振荡行为的初始化以及 (后面 3 个图) 斑点片段的持续输运，在圆顶形状的前端趋化物通量的浓度最大。图 (b) 中，尽管组成部件反复变化，运动的斑点片段的粒子成分仍表现出持久的形状；粒子群大小为 900 个，SA90，RA45，SO9，pID 0.001

本模型与生物现实符合得较好，图 21 中给出了使用存活的原质团的实验中记录的斑点片段的例子。图 21 (a) 中为一种斑点运动的自推进，不需要吸引或排斥控制激励。图 21 (b) 为一个斑点占据的食物源 (本例子中为蛋清)。

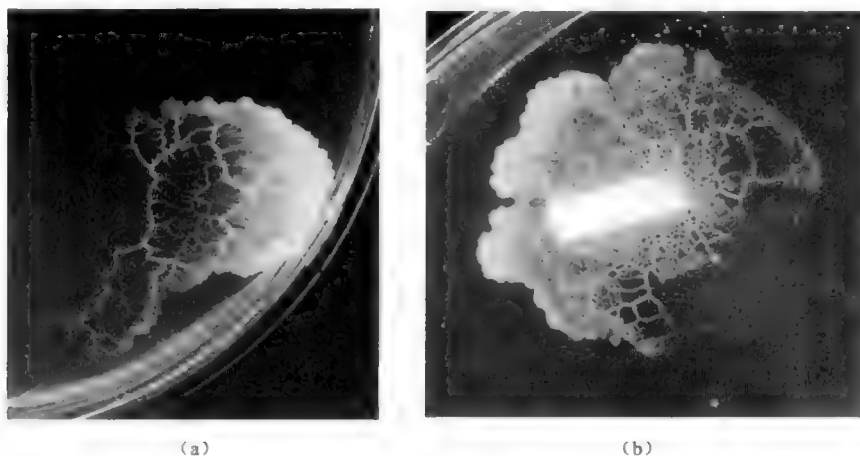


图 21 原质团斑点的例子：图 (a) 为自推进；图 (b) 为食物源激励。详见文献 [53] (见书后 p. 23 彩图 21)

4.5 集体运动的外部影响——吸引和排斥

多头绒泡菌原质团的运动受到局部环境条件的强烈影响，吸引源（比如增加温度梯度和趋化物营养）会引起原质团向吸引物运动和生长，而排斥源（盐、干燥区域）则会使原质团避开这些区域。原质团能够集合许多单独的局部输入来计算其对环境的响应，其中的一种方法是通过响应吸引物或者危险情况对局部振荡模式的调制来实现的。吸引物倾向于增加局部振荡强度，而危险情况则会减小振荡强度。这里我们开始研究对外部影响的局部响应是否能够被用来控制粒子群的机体运动。

吸引源在前面是作为一种通过将粒子集体固定以将其限制在一个区域内的方法，通过从外部为虚拟材料的内聚斑点给定一个吸引源（实际上是营养源，见图 23（a）），我们发现给定吸引源会导致从源的扩散（见图 23（b））。这也得到实验上的证实，比如图 22，通过逐点安排吸引物能够引导原质团沿任何不交叉的轨迹运动。

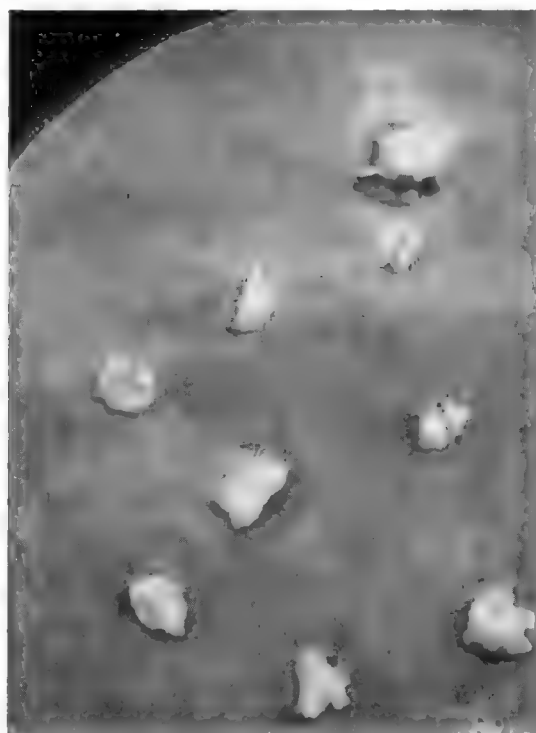


图 22 使用一系列燕麦片食物源导引原质团。原质团接种于最北侧的燕麦片上，并将其向南导引。实验照片，详见文献 [53]（见书后 p. 24 彩图 22）

当扩散至粒子集体前方的最近粒子的传感器时，它将引起向源的运动，出现了边缘区的伪足样延伸，并向源扩展（见图 23（c）），最终将其吞没。在导引向源的集体内自发产生的行波，引起粒子集体的位置偏向源（见图 23（d））。源的消耗可简单地通过在源被一个粒子覆盖时减小投向扩散场的值来模拟。当源被粒子群“耗尽”时，粒子集体恢复至其先前的近似圆形。

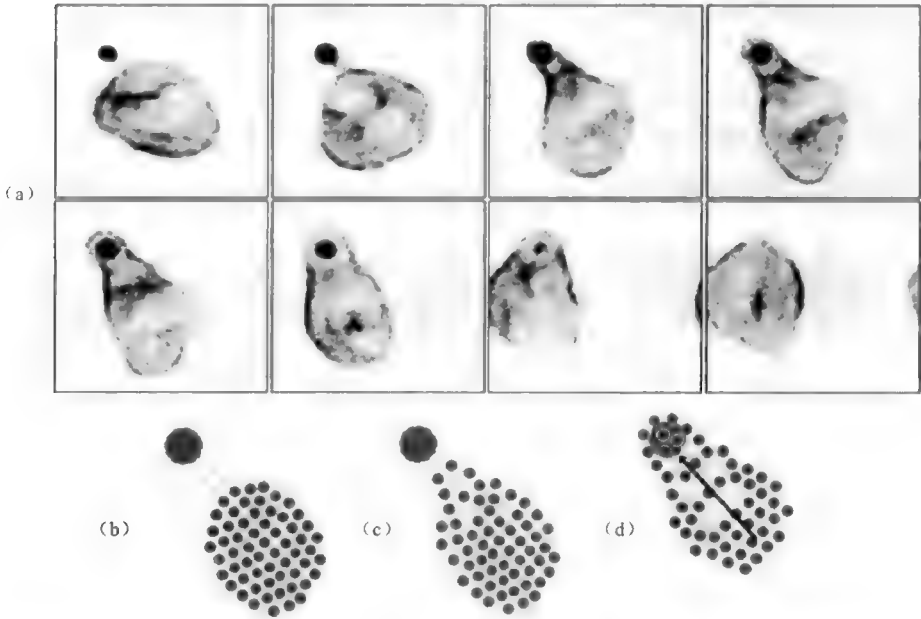


图 23 通过吸引物外部控制无定形运动。图（a）为置于扩散场中的持久趋化物源引起粒子集体的延伸，粒子集体通过由行波向源的运动将源吞没。当源被耗尽时，粒子集体恢复到其原先的近似圆形。图（b）为通过营养源吸引粒子集体的示意性说明。图（c）为粒子被导引向源时引起的迁移。图（d）显示行波的出现推动粒子集体将源吞没

为了近似粒子集体对危险源的排斥，比如对可见光照射的模拟响应，我们在算法的传感阶段增加了一个条件，其意思是，如果粒子集体中的任何粒子位于一个暴露在“光照”中的区域内（场景内定义的区域），则那些粒子对趋化物的灵敏度将会减弱，同时它们仍然保持在这些区域内（这可以通过使用小于 1 的权重系数来增加采样传感器的值来实现，较低的值产生对照射更强的响应）。粒子集体的暴露区域对模拟光损伤的影响是粒

子集体立即开始远离照射区域（见图 24（a）），特别地，振荡波从照射区域移向未暴露区域。粒子从照射区域的偏移最终使粒子集体远离激励物——远离光的运动，起初可在照射区域和未暴露区域之间的界面上被发现。在照射前（见图 24（a）），集体的所有区域均等地吸引粒子（淹没在由粒子运动的差异和集体内的固有振荡所引起的波动中）。在集体中的粒子间存在一个较强的耦合，它是由偏移传感器的距离引起的。在照射区域交界面上的其中一些粒子接受从未暴露区域的输入并被吸引向那些区域，因为未暴露区域中的趋化物浓度由于照射区域中的阻尼而被较大地感知（见图 24（a））。在交界面附近的粒子向未暴露区域的运动引起了新的空缺空间（见图 24（a））和趋化物浓度的增加（因为只有运动的粒子放置趋化物）。这将导致向交界面区域吸引力的进一步增大，直到整个粒子集体最终从照射区域迁移出来。

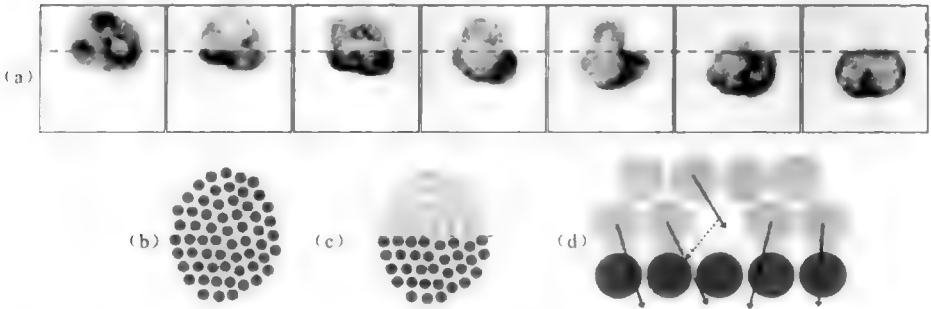


图 24 粒子集体避开模拟的光照射。图（a）中，虚线框内的区域受到模拟光照射的激励，粒子集体的振荡向未暴露区域发出行波，并使粒子集体移动远离照射区域；图（b）为照射前条件的示意性说明——所有粒子感受相同的趋化物浓度；图（c）中，照射区域（顶部）被感知为较弱的浓度；图（d）中，照射边界处的粒子被更多地吸引至未暴露区域，沿交界面的迁移使趋化物得以被放置，从而进一步引起向该区域的吸引和空缺空间的出现（见书后 p. 24 彩图 24）

文献 [53] 中讨论了一系列的排斥场，它们可用于对多头绒泡菌的控制。光照和盐是进行排斥控制的最简单的物理方法，图 25 中给出了一个使用氯化钾的晶粒分裂原质团斑点的例子。起初原质团斑点向东北向行进，当接近盐晶粒时，斑点受到排斥力并自分裂为两个斑点——一个向西北方向行进，另一个则向东南方向行进^[53]。

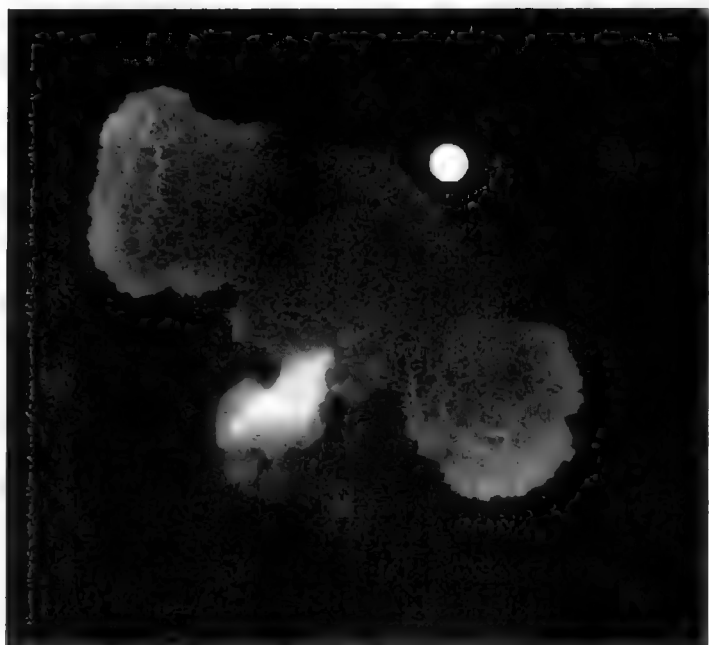


图 25 使用氯化钾晶粒分裂原质团斑点 白色圆盘表示盐晶粒的位置。详见文献 [53] (见书后 p. 25 彩图 25)

4.6 粒子集体的形态适应性

前面的结果表明，粒子集体在自振荡行为过程中改变其形状并对模拟的吸引物和危险情况做出响应。相对无定形的粒子集体——通常是圆形图案的变化——由于组成粒子群的单个粒子的内聚性而保持其形状。当粒子集体的形态受到其运动走向的扰动，或者远离外加激励时，在激励去除后它能够恢复其原来的形状。形态适应性是机器人器件中所期望的特性，因为它使机器人在尺寸和运动上具有较大的柔性，使其能够穿越传统上很难越过的环境（比如狭窄空间、栅栏等）。这一特性是唯一的可能，因为运动的特性和对粒子集体的导引分布在整个粒子中，而不是像传统机器人系统那样位于固定的尺寸和不可变的单元内。这也是多头绒泡菌原质团所具有的情形，原质团响应其环境以适应其形状和生长模式。多头绒泡菌原质团的一个最突出的特性是在外部损坏的情况下仍能够生存的能力，这已超越了简单的吸引和排斥。从生长的尖端上切下的一小块原质团能够生存，而且实际上会继续运动并长大为单独的实体。此外，当两个独立的原质团相互靠近时，它们能够融合为一个原质团。从机器人的角度看，这些现象

不仅在可恢复性和损坏修复方面令人期待，而且在机器人运动和控制上提供了新的且至今很少被探索的机会。

我们现在开始研究粒子集体是否也能够复制这些在实际原质团中发现的高度期待的特点。我们使用一个较大数量的单个振荡集体（5 000 个粒子）并通过其中心外加一个窄带危险模拟光照射（见图 26（a），虚线框表示照射区域），粒子立即开始争相远离两侧的照射区域；而且粒子集体将其直径变窄并使其进一步变得“缺乏”，直到集体分裂为两个独立可控的“斑点”。其中的分裂机制可由不同的方式加载，比如两个形成的斑点具有同等的尺寸和相似的振荡特性。另一个方法是有可能将机体裂解为两个大小不同的斑点——想象一个足够小的斑点能够自发地朝一个持久的方向运动，有可能使用“牵引”制（外加吸引物）或者“推动”机制（模拟光照）单独地导引每一个斑点。在图 26（b）中，我们通过使用模拟照射光从相反的方向将右下方的斑点（箭头所指）推向较大的斑点，当斑点逐渐接近时（特别地，它们相互之间具有足够的距离，使得每一个斑点中边缘上的粒子足以感受到其他斑点中的趋化物通量），每一个斑点最接近的边缘区域向对方激增，并且通过融合形成一个较大的集体。

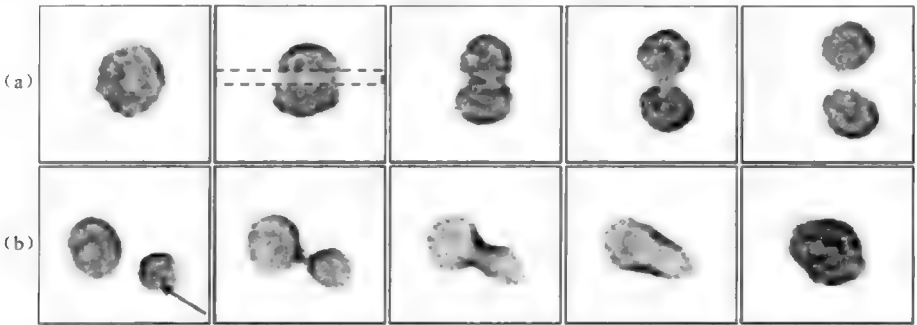


图 26 通过分裂和融合控制斑点形态。图（a）中，一个聚集粒子的斑点能够通过外加模拟光照射（虚线框区域）分裂，引起虚线区域内通量的分裂，单个斑点分为两个较小的斑点，每一个小斑点都能够独自振荡并进行外部控制。图（b）为两个独立粒子集体的融合，右下方的斑点按箭头所指的方向沿对角线向上导引至较大的斑点，最后两个独立斑点融合形成一个集体

作为一种由粒子集体适应性形态赋予的机器人柔性，以及由其外部控制实现的导引机制的例子，我们在图 27 中给出了一个斑点如何能够被从外部导引（在这种情况下，由模拟光照产生一排斥的“推力”）以穿过一个包含一系列障碍物的路径，而且这些障碍物比粒子集体本身的直径更窄。

斑点会响应不同的障碍物自动将其结构分开，并通过粒子的相互吸引和內聚力恢复其形状。粒子集体通过简单地避开模拟光照来导引（没有给出光照位置，根据前面的例子，只要简单地将粒子集体的后向部分暴露以推动其向前），而不需要对个体组件进行精细控制，也不需要路径选择进行复杂的预先确定。当去掉障碍物后，粒子集体恢复其原来的圆形。如果斑点再次通过障碍物路径向后返回，路径选择会与原先具有相同结果的路径有所不同。

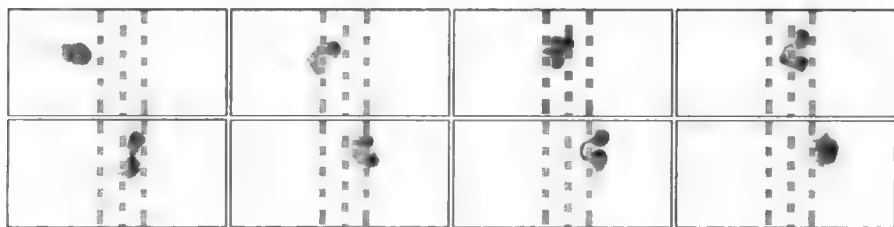


图 27 粒子集体适应性形态的应用。通过应用外部光照射（没有给出）“推动”斑点穿过障碍物路径，障碍物路径的宽度比斑点本身更窄（从左到右）

5 结论和讨论

本文中我们研究了在非常小的尺度上使用黏菌多头绒泡菌作为原始生物体产生和控制原动力的问题。多头绒泡菌之所以引起人们注意，是因为它能够满足许多物理和计算特性，而这些特性在机器人学应用中正是所期望的（自振荡、组成部分简单、分布式传感和动力控制、多传感激励的集成、无定形的适应性的形状、对外部影响的耐受性、耐损伤、自修复）。我们使用生物体本身证实并测量了其使用固有振荡和原质团流举起和泵送材料的能力，我们还使用照射激励研究了从外部影响和抑制泵送及输运行机制，它可以作为一种转向机构原型。我们使用从哑铃形原质团的双向往返输出得到的实际实验数据来驱动一种模拟机构，一种 Braitenberg 型汽车，并使用照射激励作为转向力。

在许多方面，由于其中组合了机器人运动和控制功能的方式，多头绒泡菌可被看作是一种所谓的“智能材料”的生物实例。关于生物体最感兴趣的问题，可能是：这种复杂的行为是如何通过如此简单的组成部件的相互作用而实现的？这个问题的答案之一，可能由非生物智能材料的发展来提供。非生物智能材料具有多头绒泡菌原质团证实的所有优点，但没有其

中的一些局限性。原质团本身的局限性包括其相对较慢的速度，其作为一个活的生物体的脆弱性以及其不可预测性，因为原质团只关注其生存而不是实验者人为施加的目标。

我们试图通过在一种基于粒子的计算模型中的、近似这种复杂的振荡行为，来研究多头绒泡菌自然复杂性的问题。由于原质团组成部分和结构的简单性，所以任何对其复杂性“神秘源”的寻找都不会有结果。相反，我们从反方向回答所提出的问题，而不是试图找到生物体如何从简单的部件产生这种复杂的行为。是否可以由简单的部件和相互作用来人工产生类似的复杂行为？我们使用先前提出的自然输运网络的粒子模型，而且使用具有相同特性的粒子的机体来构建并最小化合成和自然输运网络，并使用一个非常简单的方法修改其动力算法，从而得到了一个更具抵抗力且被中断的粒子流，而不是平滑的网络流。在粒子通量中增加抵抗力，足以产生与那些在多头绒泡菌原质团中观察到的相类似的复杂振荡动力学。

我们通过将稠密堆积的粒子群构型为不同的形状，能够产生可靠且规律性的振荡运动，并使其成为自然的行波，而且这些行波能够被塑造成旋转、往复、螺旋式以及耦合的输运机构。这些波由模拟的趋化物通量的波峰和波谷组成，并且发现它们能够沿相反的方向传播，而且比产生波的相关粒子的运动具有更大的速度。较小的未受约束的孤立机体会引起内聚性的“类斑点”的虚拟材料块，这些斑点具有自发振荡，并使得集体的无定形运动作为一种粒子群响应其内部振荡而重组其自身。类斑点块的外部控制受到激励具有吸引力（“牵引”集体）和排斥力（通过模拟光照“推动”）的集体的影响。非常小的粒子群会引起自发且持久的无定形向前运动，我们同样能够复现多头绒泡菌原质团的韧性，来通过将集体分裂为两个分开且独立的斑点，或者融合两个独立的斑点以形成一个功能斑点将其破坏。最后通过比集体自身直径更窄的障碍物场导引粒子集体，证实了集体的形态适应性。

本文中给出的结果证实了：简单材料（实际的和虚拟的）中非常简单且局部低层次的相互作用如何能够产生复杂且自然的行为。这些行为似乎超越了它们所组成的简单物质的能力所及。另一个所指明的是，自然行为能够通过给定吸引和排斥激励（在生命系统中我们不愿使用“控制”一词，但这可能适用于合成系统）经受外部影响。当然这些材料的特性也没有什么神奇或特别的地方；复杂性只出现在它们的相互作用当中。这种复杂行为被生物体毫不费力地利用，比如将多头绒泡菌作为一种吝啬的生存策略的一部分，使它们能够持久地经受不可预测的、可变的且危险的环境

条件。通过理解复杂行为背后的产生机制,我们相信,小尺度机器人器件有可能在其物理材料中加入这些特点。通过利用机器人本身进行分布式计算、输运和运动,有可能减少组成部件的总数量,并且同样可以减少不同类型部件的数量,这样就可以进一步简化器件的加工。

致谢

本工作部分地受到 Leverhulme Trust 研究基金 (F/00577/1) 的资助 “Mould intelligence: biological amorphous robots”。第 2.2 节中的实验是在 Southampton 大学 Hywel Morgan 教授实验室中进行的,它也是 Life Sciences Interfaces Forum 资助项目的一部分 (项目管理者: Klaus-Peter Zauner 博士)。

参考文献

- [1] Fearing, R. S. : Survey of sticking effects for micro parts handling. In: Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 1995 Human Robot Interaction and Cooperative Robots, vol. 2, pp. 212 – 217. IEEE, Los Alamitos (2002)
- [2] Ai, B. Q. , Xie, H. Z. , Wen, D. H. , Liu, X. M. , Liu, L. G. : Heat flow and efficiency in a microscopic engine. The European Physical Journal B 48 (1), 101 – 106 (2005)
- [3] Sher, I. , Levinzon-Sher, D. , Sher, E. : Miniaturization limitations of HCCI internal combustion engines. Applied Thermal Engineering 29 (2 – 3), 400 – 411 (2009)
- [4] Zhang, L. , Abbott, J. J. , Dong, L. , Kratochvil, B. E. , Bell, D. , Nelson, B. J. : Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control. Applied Physics Letters 94 (6), 064107 (2009)
- [5] Dreyfus, R. , Baudry, J. , Roper, M. L. , Fermigier, M. , Stone, H. A. , Bibette, J. : Microscopic artificial swimmers. Nature 437 (7060), 862 – 865 (2005)
- [6] Den Toonder, J. , Bos, F. , Broer, D. , Filippini, L. , Gillies, M. , de Goede, J. , Mol, T. , Reijme, M. , Talen, W. , Wilderbeek, H. , et al. : Artificial cilia for active micro-fluidic mixing. Lab Chip 8 (4), 533 – 541 (2008)
- [7] Suh, J. W. , Darling, R. B. , Bohringer, K. F. , Donald, B. R. , Baltes, H. , Kovacs, G. T. : Fully programmable MEMS ciliary actuator arrays for micromanipulation tasks. In: Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2000, vol. 2, pp. 1101 – 1108. IEEE, Los Alamitos (2002)
- [8] Trimmer, B. A. , Takesian, A. E. , Sweet, B. M. , Rogers, C. B. , Hake, D. C. ,

- Rogers, D. J. : Caterpillar locomotion: A new model for soft-bodied climbing and burrowing robots. In: 7th International Symposium on Technology and the Mine Problem. Citeseer (2006)
- [9] Saga, N. , Nakamura, T. : Development of a peristaltic crawling robot using magnetic fluid on the basis of the locomotion mechanism of the earthworm. *Smart Materials and Structures* 13, 566 (2004)
- [10] Umedachi, T. , Kitamura, T. , Takeda, K. , Nakagaki, T. , Kobayashi, R. , Ishiguro, A. : A Modular Robot Driven by Protoplasmic Streaming. *Distributed Autonomous Robotic Systems* 8, 193 – 202 (2009)
- [11] Kubea, C. R. , Bonabeau, E. : Cooperative transport by ants and robots. *Robotics and autonomous systems* 30, 85 – 101 (2000)
- [12] Zhang, S. : Fabrication of novel biomaterials through molecular self-assembly. *Nature biotechnology* 21 (10), 1171 – 1178 (2003)
- [13] Lobovkina, T. , Dommersnes, P. G. , Tiourine, S. , Joanny, J. F. , Orwar, O. : Shape optimization in lipid nanotube networks. *The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics* 26 (3), 295 – 300 (2008)
- [14] Lobovkina, T. , Gozen, I. , Erkan, Y. , Olofsson, J. , Weber, S. G. , Orwar, O. : Protrusive growth and periodic contractile motion in surface-adhered vesicles induced by Ca^{2+} – gradients. *Soft Matter* 6 (2), 268 – 272 (2010)
- [15] Lagzi, I. , Soh, S. , Wesson, P. J. , Browne, K. P. , Grzybowski, B. A. : Maze solving by chemotactic droplets. *Journal of the American Chemical Society* (2010), doi: 10.1021/ja9076793
- [16] Dillon, R. H. , Fauci, L. J. , Omoto, C. , Yang, X. : Fluid dynamic models of flagellar and ciliary beating. *Annals of the New York Academy of Sciences (Reproductive Biomechanics)* 1101, 494 – 505 (2007)
- [17] Ijspeert, A. J. : Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review. *Neural Networks* 21 (4), 642 – 653 (2008)
- [18] Adamatzky, A. , Arena, P. , Basile, A. , Carmona-Galan, R. , de Lacy Costello, B. , Fortuna, L. , Frasca, M. , Rodriguez-Vazquez, A. : Reaction-diffusion navigation robot control: from chemical to vlsi analogic processors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers [see also IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications]* 51 (5), 926 – 938 (2004)
- [19] Adamatzky, A. , de Lacy Costello, B. , Skachek, S. , Melhuish, C. : Manipulating objects with chemical waves: Open loop case of experimental belousov-zhabotinsky medium coupled with simulated actuator array. *Physics Letters A* 350 (3 – 4), 201 – 209 (2006)
- [20] Maeda, S. , Hara, Y. , Sakai, T. , Yoshida, R. , Hashimoto, S. : Self-Walking Gel. *Advanced Materials* 19 (21), 3480 – 3484 (2007)

- [21] Adamatzky, A. , De Lacy Costello, B. , Shirakawa, T. : Universal computation with limited resources: Belousov-zhabotinsky and physarum computers. *International Journal of Bifurcation and Chaos* (2008) (in press)
- [22] Nakagaki, T. (ed.) : *Int. Journal of Unconventional Comput. Special Issue: The Birth of Physarum Computing*. Old City Publishing (2010)
- [23] Adamatzky, A. : Developing proximity graphs by physarum polycephalum: Does the plasmodium follow toussaint hierarchy? *Parallel Process. Lett.* 19, 105 – 127 (2008)
- [24] Shirakawa, T. , Gunji, Y. P. : Computation of Voronoi diagram and collision-free path using the Plasmodium of Physarum polycephalum. *Int. J. Unconventional Computing* 6 (2) , 79 – 88 (2010)
- [25] Shirakawa, T. , Adamatzky, A. , Gunji, Y. P. , Miyake, Y. : On simultaneous construction of voronoi diagram and delaunay triangulation by physarum polycephalum. *International Journal of Bifurcation and Chaos* 19 (9) , 3109 – 3117 (2009)
- [26] Tero, A. , Kobayashi, R. , Nakagaki, T. : Physarum solver: A biologically inspired method of road-network navigation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 363 (1) , 115 – 119 (2006)
- [27] Tero, A. , Takagi, S. , Saigusa, T. , Ito, K. , Bebbber, D. P. , Fricker, M. D. , Yumiki, K. , Kobayashi, R. , Nakagaki, T. : Rules for biologically inspired adaptive network design. *Science* 327 (5964) , 439 – 442 (2010)
- [28] Adamatzky, A. , Jones, J. : Road planning with slime mould: If physarum built motorways it would route m6/m74 through newcastle. *International Journal of Bifurcation and Chaos* (2010) (in press)
- [29] Adamatzky, A. : Physarum machine: Implementation of a kolmogorov-uspensky machine on a biological substrate. *Parallel Processing Letters* 17 (4) , 455 – 467 (2007)
- [30] Adamatzky, A. , Jones, J. : Towards Physarum robots: computing and manipulating on water surface. *Journal of Bionic Engineering* 5 (4) , 348 – 357 (2008)
- [31] Tsuda, S. , Zauner, K. – P. , Gunji, Y. – P. : Robot control with biological cells. In: *Proceedings of the Sixth Int. Workshop on Information Processing in Cells and Tissues*, St. William's College, York, August 30 – September 1, pp.202 – 216 (2005)
- [32] Nakagaki, T. , Yamada, H. , Ueda, T. : Interaction between cell shape and contraction pattern in the Physarum plasmodium. *Biophysical Chemistry* 84 (3) , 195 – 204 (2000)
- [33] Allen, P. J. , Price, W. H. : The relation between respiration and protoplasmic flow in the slime mold, Physarum polycephalum. *American Journal of Botany* 37 (5) , 393 – 402 (1950)
- [34] Kamiya, N. : The protoplasmic flow in the myxomycete plasmodium as revealed by a

- volumetric analysis. *Protoplasma* 39 (3), 344 – 357 (1950)
- [35] Gotoh, K., Kuroda, K.: Motive force of cytoplasmic streaming during plasmodial mitosis of *Physarum polycephalum*. *Cell Motility and the Cytoskeleton* 2 (2), 173 – 181 (1982)
- [36] Smith, D. A., Saldana, R.: Model of the Ca^{2+} oscillator for shuttle streaming in *Physarum polycephalum*. *Biophysical journal* 61 (2), 368 – 380 (1992)
- [37] Kamiya, N., Kuroda, K.: Studies on the velocity distribution of the protoplasmic streaming in the myxomycete plasmodium. *Protoplasma* 49 (1), 1 – 4 (1958)
- [38] Tsuda, S., Jones, J.: The emergence of synchronization in *Physarum polycephalum* and its particle approximation. *Biosystems* (2010) (in press)
- [39] Takamatsu, A., Fujii, T.: Construction of a living coupled oscillator system of plasmodial slime mold by a microfabricated structure. *Sensors Update* 10 (1), 33 – 46 (2002)
- [40] Takamatsu, A., Fujii, T., Endo, I.: Control of interaction strength in a network of the true slime mold by a microfabricated structure. *BioSystems* 55, 33 – 38 (2000)
- [41] Häder, D. – P., Schreckenbach, T.: Phototactic Orientation in Plasmodia of the Acellular Slime Mold, *Physarum polycephalum*. *Cell* 25 (1), 55 – 61 (1984)
- [42] Wolf, R., Niemuth, J., Sauer, H.: Thermotaxis and protoplasmic oscillations in *Physarum* plasmodia analysed in a novel device generating stable linear temperature gradients. *Protoplasma* 197 (1 – 2), 121 – 131 (1997)
- [43] Anderson, J. D.: Galvanotaxis of slime mold. *J. Gen. Physiol.* 35 (5), 1 – 1 (1951)
- [44] Nakagaki, T., Yamada, H., Ueda, T.: Modulation of cellular rhythm and photoavoidance by oscillatory irradiation in the *Physarum* plasmodium. *Biophysical Chemistry* 82, 23 – 28 (1999)
- [45] Nakagaki, T., Uemura, S., Kakiuchi, Y., Ueda, T.: Action spectrum for sporulation and photoavoidance in the plasmodium of *Physarum polycephalum*, as modified differentially by temperature and starvation. *Photochem. Photobiol.* 64 (5), 859 – 862 (1996)
- [46] Braitenberg, V.: *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*. MIT Press, Cambridge (1984)
- [47] Jones, J.: The emergence and dynamical evolution of complex transport networks from simple low-level behaviours. *International Journal of Unconventional Computing* 6 (2), 125 – 144 (2010)
- [48] Jones, J.: Characteristics of pattern formation and evolution in approximations of *Physarum* transport networks. *Artificial Life* 16 (2), 127 – 153 (2010)
- [49] Tsuda, S., Jones, J.: The emergence of complex oscillatory behaviour in *Physarum polycephalum* and its particle approximation. In: *Artificial Life XII*, pp. 698 – 705 (2010)

- [50] Flynn, M. R. , Kasimov, A. R. , Nave, J. C. , Rosales, R. R. , Seibold, B. : Self-sustained nonlinear waves in traffic flow. *Physical Review E* 79 (5), 56113 (2009)
- [51] Durham, A. C. H. , Ridgway, E. B. : Control of chemotaxis in *Physarum polycephalum*. *The Journal of Cell Biology* 69, 218 – 223 (1976)
- [52] Nakagaki, T. , Kobayashi, R. , Nishiura, Y. , Ueda, T. : Obtaining multiple separate food sources: behavioural intelligence in the *Physarum plasmodium*. *R. Soc. Proc. : Biol. Sci.* 271 (1554), 2305 – 2310 (2004)
- [53] Adamatzky, A. : *Physarum Machines*. World Scientific, Singapore (2010)

第十一章 使用有机计算原理开发 自组织机器人单元

Alwin Hoffmann, Florian Nafz, Andreas Schierl,
Hella Seebach, Wolfgang Reif

Augsburg 大学软件与系统工程研究所, 86135, Augsburg, 德国

摘要:现如今, 工业机器人通常需要人们去花费较大的精力去设计和规划, 它们在实际应用中的运行过程里则具有固定的行为, 不能对它们所处的环境变化做出反应, 所以出现故障后很难补偿, 只能由人工参与去修复。有机计算的思想是使系统能够具备类生命特性, 比如自组织或自愈。本文中我们提出了一种分层的体系结构来将这两个词结合在一起, 然后讨论每一层的需求以使工程师能够将自- x 特性加入这种系统中。所提出的方法使自组织机器人应用能够得以开发, 它们能够利用有机计算原理, 所以在运行过程中更加稳健且具有柔性。

1 介绍

在结构方面, 传统的自动化系统完全是静态的, 其中的物质流是固定的, 而且每一个部件是根据规划的系统结构得以优化, 从而达到最大通量的。这种方法非常适用于批量生产, 比如在汽车行业中, 需要相当长的时间去生产一个产品, 即使使用工业机器人, 也不能改变这一情况。实际上, 工业机器人非常灵活, 如果给定合适的工具, 它们能够执行大量的各种任务¹⁰。但是, 当今工业机器人复杂且烦琐的编程、增加器件时的固定布线和难以集成, 以及车间中非常静态的布局, 都没有利用机器人解决方案时的灵活性。所以, 需要较大的努力去定制和调整自动化系统, 使得它们很难应用于不同产品的小批量生产, 因为这其中需要定期的产品变化。再者, 使用传统的自动化系统很难实现故障容限和柔性优化。

另一方面,人们使用有机计算^[3,20,39]和自主计算^[6,15]的思想来开发具备自-x特性的系统,比如自愈合(也即故障补偿)、自优化(也即根据给定的适应度函数自主计算)或者自适应(即对新的或者变化的任务,或者一个不同的系统结构的适应性)。在生产自动化的背景下,其目的是为建立有机自动化系统提供结构和技术,其中“有机”一词意思是类似生命的行为,或者更精练地说,是能够自主地适应环境变化的系统。这种行为通常可以通过使用生物启发的范式和算法来实现,比如遗传算法或基于信息素的方法。

这样,有机计算原理和机器人技术相结合的精心设计使我们能够得到超灵活且稳健的自动化系统。其中,作为移动平台或者工业机械手的机器人提供机械柔性,且具有完成大量不同种类任务的能力;有机计算在系统中引入自组织,使它们能够进行自愈合、自优化或者自适应。例如:一个有机自动化系统由于其自愈合能力而能够进行故障补偿,使其能够在功能退化后继续运行,这是机器人系统的一个基本要求,而且变得越来越重要^[11]。尤其是在中小型企业中,需要在晚上进行模型改变,这种系统就会受到欢迎。使用自优化,能够对自动化系统在其运行期间进行连续且自主的优化而不需要外部的相互作用。最后,由于其自组织,有机系统能够可重构设计,而且能够很容易地适应新的任务和产品,这是当今具有动荡市场且需求快速变化的全球化经济的要求^[17]。但进化方法和生物启发原理单靠出现的想法,还不能直接用于生产系统,“出现”在一定程度上需要被控制和导引以完成一个确定的目标,即制造一个产品。

本文中,我们将概述如何能够将自-x特性和有机计算原理应用于工业机器人的制造单元中^[2]。在前面的工作中,我们已经介绍了一种基于有机计算原理建模和设计自组织资源流动系统的方法^[31],并给出了如何为这类系统指定一个行为通道的方法^[8]。此外,我们还开发了一种用于系统地工程化自组织资源流动系统的指导原则^[30],并使用形式方法证实了它们功能的正确性^[23]。

由于机器人制造单元通常构成一个资源流系统,在其中一步一步地制造一个产品(即资源),我们的方法能够应用于工业机器人领域。但我们确定了三个有关机器人的特定挑战,其中一个必须面对,以建立自组织机器人单元。这些挑战从机器人单元布局中出现的未受控制的问题,到当前软件架构的局限性,都将在第2节中详细讨论。基于这些挑战,我们提出了一种多层架构(第3节),它使得能够使用有机计算开发自组织机器人

制造单元。每一层在不同的抽象级别上寻址该系统，并具有完全不同的任务以满足架构需要。在第4节中，我们用简单且充足的案例研究阐述了我们的方法。最后，在第5节中，得到结论并提炼了未来的研究步骤。

2 挑战

我们认为，应用有机计算原理的自组织机器人单元的开发具有三个主要的挑战：

(1) 为了使有机系统为工业领域所接受，必须控制出现以完成确定的目标。

(2) 为了应用自-x 特性，机器人单元的布局必须提供额外的自由度。

(3) 为了利用三个额外的自由度，机器人软件构架必须提供关于编程技术方面的柔性，以应对几何不确定性和设备集成。

下面的章节中，将详细介绍这些挑战及其对有机自动化系统发展的影响。

2.1 控制出现

自组织系统的一个主要概念是出现，“出现”描述由相对简单的个体及其局部相互作用引起的复杂系统行为的显现，而不需要中心组织的控制。这样，系统行为不能被明确地进行编程，而是这些局部相互作用产生结果。自然行为的一个例子是蚁群。在蚁群中没有中心控制，相反，每一个蚂蚁是一个自主的单元，其反应取决于信息素之类的局部信息和基因编码规则。

所以，整个系统的行为不能被精确地预测，Müller-Schloer^[18]称这一类行为为自下而上的约束传播，它与技术系统的经典的自顶而下设计形成对比。在后面的方法中，开发人员尝试建模和实现所有可能的系统状态，这通常开始于一个高层规则，直到大量的转换和改进后，最后生成可执行的代码。

但对复杂系统进行完成建模通常是不可行的，而且它甚至与出现的思想相矛盾。为了解决这一矛盾，我们提议为每一个有机生产系统定义一个具有良好预期的行为通道¹⁸。在该通道内，自然行为是被赞成甚至是被期望的，而当这一通道被丢弃时，系统将处于一个特殊的状态（见图1）。

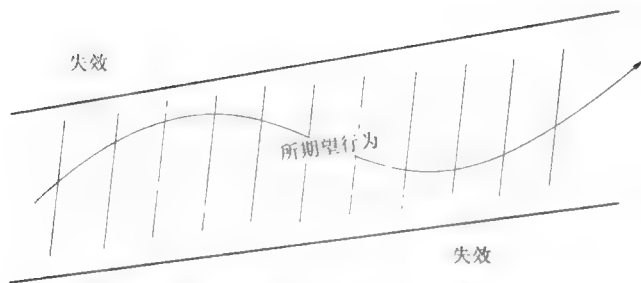


图1 有机系统需要一个期望行为的通道,在该通道内,自然行为是被赞成甚至是被期望的

这一通道由系统开发人员通过约束来定义,并允许控制出现。通常,这些约束可由系统的每一个自主组件来局部观察到,如果违反了一个或多个约束,组件将试图局部地恢复该约束;如果不可能恢复,它将开始牵涉周围组件直到发现一个满足这些约束的有效结果。在有机计算中,将这一类构架称为观察器或控制器构架^[18,31]。通过这样做,有机自动化系统就可以进行自组织,并能够被导引以完成一个确定的目标,比如制造产品。此外,还能够给定功能正确性方面的行为保证^[21]。

2.2 增加自由度

长期以来,人们设计和调整自动化系统以完成预定义的任务。在单工位自动化单元中,生产机器通常会装备一个物料搬运系统(例如:一个用于装载和卸载该机器的机器人)和一个存储系统。由于这种设置,单元能够进行无人值守的操作,可一旦任何一个组件中断,系统将停止工作。一个自动化生成线由多个工位组成,这些工位由运输系统自动连接,运输系统将零件从一个位置转移至下一个位置。同样,如果一个组件中断,整个系统也将停止工作。根据文献[40],柔性制造系统在产品定制和故障补偿上仍然能力有限,该文献甚至指出,传统的方法不能提供柔性制造和适应性系统的需要。

为了变得自组织,自动化系统需要增加自由度和可用硬件的冗余。没有这些先决条件,系统就不能适应新的环境条件或者故障补偿:

- 对于自愈合,有机自动化系统需要冗余的硬件组件,否则,它就不能补偿一个组件的故障,也不能在功能退化后继续运行。
- 关于自适应,有机生产系统需要自由度,即柔性的工具或者运输系统,以适应任务的改变、新的任务以及修改系统结构。

- 最后, 自优化只有在拥有几个自由度时才有可能, 这样就可以对给定的适应度函数进行优化。

正是由于这些原因, 我们才相信, 有机计算机器人单元非常适合于自组织。在基于机器人的系统中, 通过增加机器人、冗余机器人或者换刀系统, 能够增加自由度。在输运方面, 可以使用转盘、双向输送机或者甚至是移动平台将机器人连接在一起, 进一步的详细说明将在第3节中给出。但在这里有必要提及的是, 冗余如何添加的具体选择能够影响系统的稳健性和平均无故障时间, 就像第4节中的例子给出的那样。如果给定一个组件, 则所有的冗余通常都是一个坏的选择, 因为一个组件故障将导致完全丧失可用冗余。为了找到良好的分布冗余策略, 可以使用 ADCCA (Adaptive Deductive Cause-Consequence Analysis, 自适应推理原因-结果分析) 技术^[9], 这种技术用来计算那些导致整个生产系统瘫痪的最小的故障组合。我们还可以使用类似的安全分析技术, 比如故障树分析^[37], 来辨别单点或 n 点故障, 并相应地优化冗余分布。

2.3 软件柔性需求

通过增加自由度和可用器件的冗余以及车间布局的冗余, 可以实现自组织。但是为了全面利用自- x 特性, 有必要在软件柔性方面增加机器人系统架构的需求。

柔性和可重构自动控制系统需要引入智能产品来存储有关存储控制系统如何动作的信息, 这可以通过比如使用 RFID^[40] 来实现, 其结果是, 需要一种配置和命令工业机器人的、以产品为中心的方法, 需要用考虑了环境和避开障碍物的、更加动态的运动规划来代替预定义的运动序列。由于动态系统的特性, 使得先前示教运动的应用不再足够, 取而代之的是, 应当考虑使用传感器反馈 (比如视觉) 或者冗余器件。有了基于传感器或者冗余的运动^[16], 就有可能在不确定其位置的环境中容错地执行复杂的机器人任务^[34]。

与这些苛刻的要求相比, 工业机器人仍然使用特定的机器人编程语言来编程, 这些语言来自早期的命令式语言, 从那时起就没有太大的演变。由于这些低层次的编程技术, 为工业机器人开发软件成了一项复杂且烦琐的任务, 需要大量的技术经验^[26]。正因为如此, 工业机器人通常被装备和编程为只执行一组预定义的任务。未来必须解决低层次的编程和高要求之间的矛盾, 以实现自组织机器人系统。

此外, 必须方便外部器件的集成。现在, 工具通常由固定的布线连接

至机器人控制器，并且通过数字或模拟的 I/O 端口通信。但当使用工具改变系统时，不需要人工作用，机器人控制器的软件必须能够独立地处理安装在机器人上的不同工具。此外，必须有可能集成任意的传感器以进行智能感知和操作先进工具，从而使复杂的抓举和灵巧的操作等能够进行^[24]。文献 [11] 中提出的即插即用机制，包含了柔性器件集成的这些需求。

3 架构

我们的方法使用了一个分层的软件构架，它在不同的抽象层上寻址系统，所提出的架构如图 2 所示。

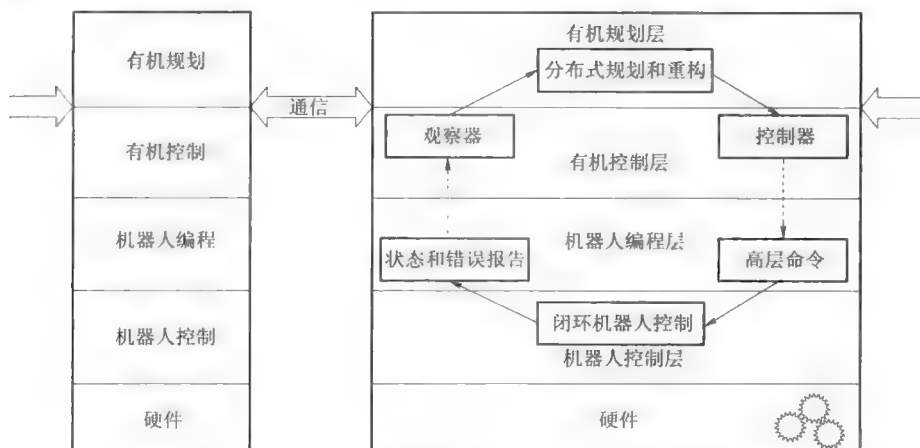


图2 为自组织机器人单元提出的构架，包含两个组件

在硬件层的顶层，为了控制机器人，设置了两个软件层：较低的一层为机器人控制层，负责实时的低层次软件控制，而较高的一层为机器人编程层，用来定义控制流并指明所需的运动工具动作。对于传统的生产系统，这三层已经足够，因为它们使得机器人能够以可靠且重复的方式执行任意的预编程任务。但为了将系统扩展至自组织，故需要另外的通信和控制软件。

因此，我们的方法中另外增加了两个顶层，它们用来根据有机计算原理控制机器人系统。第一层为有机控制层，它围绕机器人单元的组件并将它们转变为通过通信与其他代理相互协调的软件代理；此外，它还负责应用到工件的功能的执行。当该层探测到一个局部不可恢复的错误时，则会由有机规划层进行控制并寻找一个新的配置来完成任务。一旦找到一个求

解方法, 控制便会回到有机控制层以进行下一步执行。下面将从底层到顶层, 解释构架的每一层。

3.1 硬件

每一个机器人单元的基础是一组拥有工具的机器人, 这些工具由一个输运系统相连接。为了成为一个自组织生产系统, 需要增加自由度, 这一点也已在 2.2 节中指明, 这就意味着一个机器人不能只配备一个相应于预先制定任务的静态工具。在简单的情况下, 比如给机器人配备一组相同的钻头就已经足够, 这样在生产过程中它就能够在失败时及时替换。但是为了利用自组织系统的所有优点, 需要不同的工具以能够完成大量不同的任务, 这也是一种无需人工参与它们交换的方法。这可以通过使用外部工具, 自动工具交换系统, 或者通过使用先进工具, 比如允许进行灵巧操作的拟人化手来实现。

如果必须要执行不同的任务, 或者为不同的机器人指定不同的任务步骤, 输运系统也必须具有柔性。与单台输送带以给定的顺序连接机器人不同, 这种装置需要一个改变工件经过不同机器人的顺序的方法。与现有的系统相似, 机器人可以由一个旋转盘或两个输送带连接, 一个向前运动, 另一个向后运动, 这样每一个机器人都能够通过将工件放置在合适的传送带来将工件转发给其他任何一个机器人。与超柔性制造系统的想法相一致, 另一个解决方法是由一组移动平台代替传送带, 它在机器人之间穿越, 并运送部分处理后的工件。

这使得一个系统能够表现出动态行为。然而, 当希望硬件器件随着时间的推移来完成不同的任务时, 所有硬件必须由基于计算机的系统进行控制, 其软件必须为可靠地控制硬件器件提供实时的保证。

3.2 机器人控制层

底层硬件控制在机器人控制层中执行, 它负责对执行器和传感器应用开环或闭环控制法, 以使硬件执行请求的操作。所以它必须在一个实时的环境中执行, 比如在一个微控制器运行以完成简单的动作, 或者在一个实时操作系统下运行 (比如 VxWorks、QNX 或 Linux 的实时扩展系统)。对于商业的 KUKA 机器人系统, 即所谓的内核系统, 这一层是在 VxWorks 中执行的。可以使用现场总线通讯来执行运动命令, 并向附件工具发送数据。这在传感器集成或者冗余运动方面相当有限, 而在研究比如 OROCOS^[32] 的机器人控制器的领域则更加先进。此外, 控制层必须监测附加硬件的错

误，并向上一层报告这些错误，以便采取合理的故障策略。

由于一个典型的机器人动作由多于一个的、具有给定参数的单个控制律的应用组成（比如运动至一个点），机器人控制层必须提供一个允许指定多个控制律或命令的界面，这些命令被顺序或者并行地执行，这一界面也可以被编程层使用。在这一界面上指定的动作任务描述的例子有操作原语^[5]、基于约束的任务说明^[4]或者实时的原语网^[38]。

实时的原语网描述由一个或多个合作机器人执行动作，这些动作由计算原语（块）和它们之间的数据流组成，而且这些动作是在一个实时的循环中被评估，并且为硬件器件形成相应的控制环。需要执行的所有动作都具有精确给定的定时约束或者取决于每一个动作的进展，这样就能够组合为一个实时的原语网。这就使得能够将复杂或者烦琐的且具有实时需求的任务，指定为一个单独的执行操作，并且在控制层中执行它们，去除了在更高层中实时能力的需要。

图3给出了一个实时原语网的例子，它展示了机器人沿一个给定轨迹运动，紧随其后的是焊枪气流的控制动作。虚线方框表示在编程层中定义任务所使用的高层结构，而实现方框表示实时原语和它们的数据流链接。在该例子中，从轨迹发生器产生的位置值被发送到机器人块作为设置点（开环控制的典型例子），数字输出则表示轨迹一旦完成则焊枪立即启动。当然，现实生活中的焊接任务由更多的动作组成，这些动作也会包含在实时原语网中，比如焊枪的点火、沿焊缝运动以及当目的达到后熄灭焊枪。关于实时原语界面的详细介绍，见文献[38]。

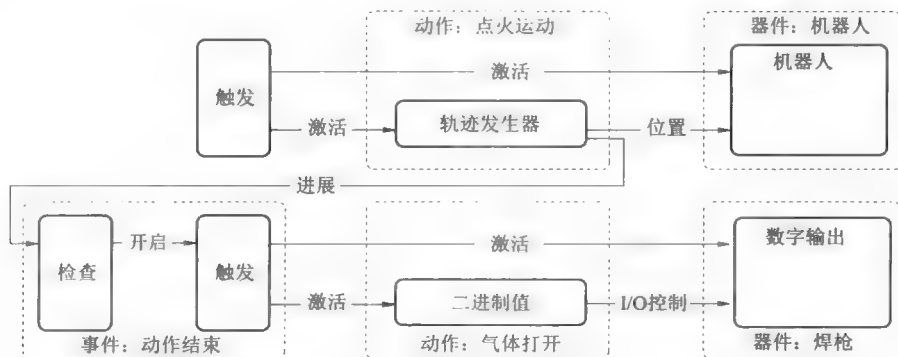


图3 描述机器人运动以及紧随其后的工具动作执行的实时原语网的例子

商业的机器人控制器通常省略了控制层和编程之间的一个明显的分离，而且在控制层执行完整的机器人程序。通过分离这些层，从而囊括了

控制层上的实时请求,也就可以在编程层上使用一种标准的编程语言,这就使编程层具有了可扩展性,而且简化了机器人程序集成到周围软件系统中的过程。

3.3 机器人编程层

机器人编程层提供了一个接受高层命令的界面,这些命令由机器人来执行。该层负责将这些命令转换为控制律或者任务描述,从而可以在机器人控制层中实时保证地执行。此外,该层还将这些命令传递至机器人控制层并监测执行进展、错误和传感器时间。对于 KUKA 机器人,这一层可以在机器人编程语言 KRL 中看到,该语言允许写入包括扩展控制流的机器人程序(比如条件语句和循环)、运动和工具命令。ABB 的 RAPID 和 FANUC 机器人的 Karel 语言,也具有相似的特征。

然而,自组织机器人单元与传统的生产单元相反,它们没有一个固定的处理或者物质流顺序,这样就不可能为每一个机器人写入一个重复执行以完成不变的机器人任务的程序,每一个机器人需要一组机器人程序(每一个针对一个机器人功能),这些程序的启动和控制由更高的架构层来进行。

当柔性生产系统的动态特性使其在输运过程中很难保证精确地定位工件时,这些系统还要处理有关物件位置的更大的不确定性。这样,为物件位置而集成的传感器反馈就变得更加重要,同样重要的还有尽可能地具有编程冗余,或者兼容的操作器或工具。同样,为机器人和移动平台规划的、具有避障功能的运动也必须能够使用该层。

当试图通过一组单个机器人程序(每一个针对一个机器人功能)控制一个柔性生产单元时,就像第 2.3 节所描述的,这些程序同样必须具有柔性和高度的可重构性。然而,在传统的机器人程序中运行详细的环境信息通常非常复杂,涉及现场总线通信,这样就限制了可能性的范围^[13]。这些问题可以通过使用一种机器人控制架构来解决,这种架构使得能够用标准的高层次编程语言来编程机器人,比如文献[1]中描述的方法。

它为机器人编程提供了一个高层的、面向对象的 API,它可以由更高层次直接应用或者可以封装为一个服务,从而可以通过比如面向服务的标准方法访问。

图 4 中给出了一个使用面向对象的 API 创建的机器人任务的例子。它包括两个机器人命令,第一个针对机器人并包含一个运动,第二个控制焊枪的气体流动。这些命令使用一个触发器来连接,触发器在第一个命令的

运动结束后开启第二个命令，这（当处理真实的焊接场景时则更多）可以使用实时保证来执行，以保证焊缝以可重复的质量创建，所以将其转换为一个实时原语网（就像图3中给出的那样），并使用机器人控制层来执行。



图4 与图3对应的机器人任务，表示为一个具有动作、器件和事件的对象结构

图5中对两机器人软件层进行了总结，机器人软件架构上面的部分（编程环境和机器人API）表示编程层，下面的部分（实时原语界面和机器人控制核）为机器人控制层的一个例子。使用了这种架构，上述的所有层都能够使用面向对象软件开发的标准方法来与机器人系统进行通信，这就简化了在软件架构中提出的位于机器人层顶部的两个有机层的开发。

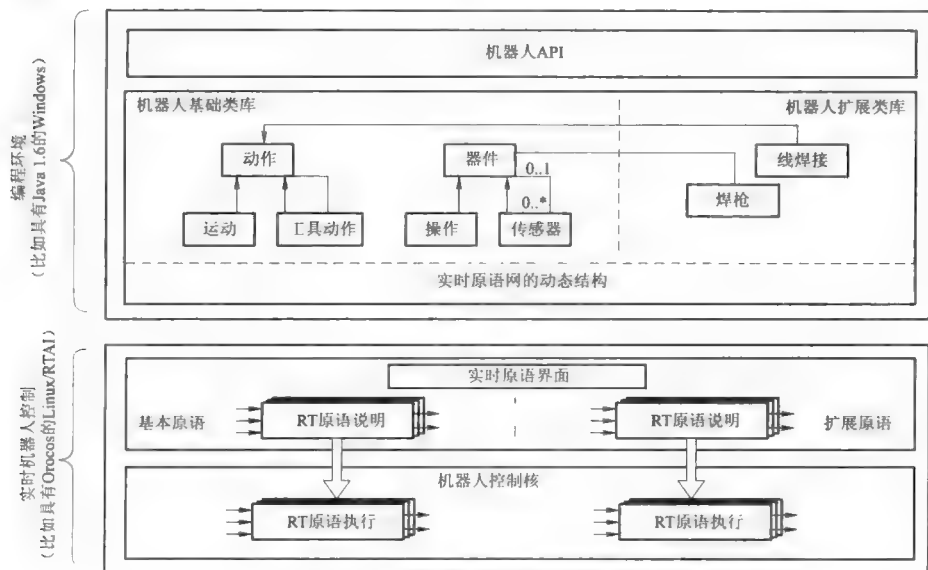


图5 机器人软件层总结

3.4 有机控制层

为两顶层提出的架构，类似于在有机计算领域中经常应用的观察器或控制器架构，它们用来实现系统的自-x 特性^[19,28]。这些层的主要任务是保持系统的行为通道（见 2.1 节），通道由 OCL 约束^[25,31]指定，它被用来在设计过程中注释特定的模型，并描述引起功能上正确行为的“好的”系统配置。通过明确地强制系统成为一组固定的配置，可得到额外的自由度，其中系统可以挑选评估为好的配置，而且约束保证了只有那些得到功能正确的系统才能被选择。这些约束定义了一种关于系统状态的不变量，并且将好的和错误的状态区分开来，它们指定机器人的正确配置必须像什么。如果违反信息被转发至规划层，该层会试图通过为系统计算一个新的配置而将它们恢复，这种方法被称为恢复不变方法，详见文献[8]中的描述。

所以有机控制层由两个主要的部分组成，观察器部分基于从较低层次接收到的系统的状态信息不断地评估约束，这里需要一个能够从机器人编程层（比如错误消息或传感器数据）接收反馈的界面。每当观察器探测到违反，它将激活规划层并传达所有收集到的信息。这里的主要挑战是以这样一种方式制定约束和间隔尺寸，从而使机器人能够局部地确定约束是否被违反。如果约束经常是只有在系统发生故障时被违反，观察器必须能够判断系统故障对约束的影响，这里故障分析^[37,9]能够探测到可能的系统故障，这能够影响约束的有效性。例如：考虑到机器人必须拥有约束，工具需要充当分配给它的角色。在机器人具有一个角色分配且机器人又需要这一工具的情况下，工具故障将引起约束违反。

这一层的第二个部分是控制器，它用来实现由规划层分配的功能，并命令机器人执行应用功能和交换资源所需要的动作。它利用由机器人编程层提供的界面并控制机器人，以保证应用了正确的功能。它还会进一步对有机规划层发出的配置做出反应，比如改变机器人的执行动作。

3.5 有机规划层

控制层的顶层为有机规划层，它由控制层的观察器来触发，负责在错误发生时计算新的配置。它分析当前状况，因为绝大多数故障不能只由单个机器人来补偿，所以它必须与其他机器人的规划层进行通信，以收集关于可用机器人和它们功能的信息，然后规划部分尝试找到一个共同的解决办法来达到目的。在找到共识后，规划层将新的配置传达给它所负责机器人的有机控制层，该层然后命令相应的机器人。

将所有自组织移至该高等级层的优点，是能够应用规划方法的全带宽，就像生物启发或者遗传算法和简单的规划者那样。所以这一层提供了一个插件接口，以使得能够使用几种方法和算法进行协调和规划，并像集中或分散变量一样去执行。系统架构师能够选择最适合他们的系统和解决问题的方法，另一个理由是在该层必须考虑实时性，因为所有的关键性命令都是在较低层上处理的。

在系统配置上，规划任务基本上是一个约束满足问题^[36,22]，决定于其应用和参数。这可以更加复杂，尤其是在机器人不具备全局信息时，这里的挑战是找到合适的、能够处理应用的特定任务的通信协议和算法。人们可能会想到在一个机器人上简单地采集全局信息，然后在这一机器人上计算一个新的配置，然后将结果扩展至其他机器人。但这种方法适用于小型的制造单元，对较大的系统则不适用。再者，人们不想经常停止整个单元，而是更钟爱局部重构，其中只有少量的机器人参与重构过程。

通常不只想要这个问题的所有答案，还需要针对实际情况的优化解。这里规划者的任务延伸至根据给定的最优标准、负载均衡标准或者最少数量的重构机器人等，为系统找到一个最优的或者几乎最优的配置。

4 一个自适应生产单元的例子

我们在本节中阐述所提出的方法对未来自适应生产单元的愿景，它表现出在传统机器人系统中应用有机原理的益处。传统的工程以更加静态的方式处理和设计这一生产单元，它由单个机器组成，这些机器用它们自己的工具加工工件，并使用传送带或相似的机构以一个严格的顺序相互连接。所以单元的布局是预先定义的，且非常不具有柔性，是刚性的。另外，可能也是最重要的一方面，这一系统极易出现系统错误，因为一个部件的故障将使整个系统停止工作。但适应性生产单元是自组织的，这就意味着它对用户定义的任务（工作计划）和部件故障补偿是自适应的。此外，它通过找到一个最适合实际工作计划的配置来优化通量。

4.1 系统描述

适应性生产单元由 KUKA 轻型机器人（LWR）组成，它们能够使用不同的工具。用柔性且自主式传送单元来代替传统的传送带，它们能够运载工件。Bussmann 在文献 [29] 中描述了柔性传送单元或传送带的一些有趣概念的思想。本实例的目的是以一个用户定义的工具应用（任务）顺序加

工件。

第2节阐述了增进传统系统的自组织所需要的冗余和软件柔性。要从冗余中获得最大的益处，重要的是在系统内冗余如何分布。例如：一个机器人有可能三次拥有同一个工具，而且是拥有这一工具的唯一一个机器人。然后，机器人能够对工具中断反应两次，但整个机器人的中断仍然是一个单点故障。所以一个更加失败的容错分布是给每一个机器人同一类型的工具，这里一个系统中中断至少需要一个三点故障。

根据这些结果，案例研究安排如下（图6）：有三个 LWRs 用于加工，四辆推车用于输运，以及两个储藏处用于提供未加工的工件并存储加工完成的产品。每一个 LWR 都能够具备所有三个功能：在工件上钻孔，将螺钉插入所钻的孔，并拧紧插入的螺钉。用户定义的标准工作计划是使用所有这三个工具加工所有工件；给定的顺序是先钻孔，然后插入螺钉，最后将其拧紧。在原理上，一个简单但不是很高性能的解决方法是使每一个机器人完成所有的功能并在每一步后变换工具。由于与应用功能的时间相比，切换工具非常耗时，所以标准的配置是让每一个机器人完成不同的工作。不同机器人间加工步骤的分布需要灵活的推车路线，所以要保持正确的顺序，图6中给出了一个这样的配置。

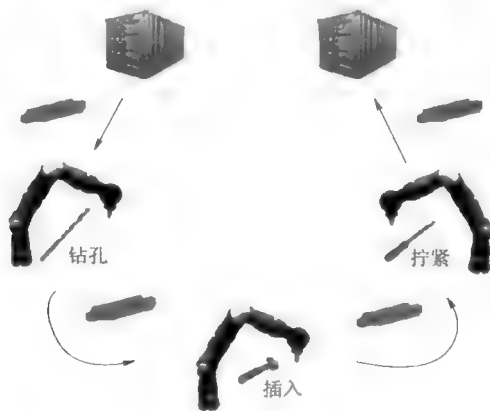


图6 适应性生产单元（见书后 p. 25 彩图6）

4.2 自组织资源流系统的设计

迄今只描述了适应性生产单元的硬件，但至少感兴趣的是本例中的软件。对于两个有机层，存在一个软件工程指导原则，它指导工程师通过几个步骤开发自组织资源流系统^[30]。所提出的机器人单元是资源流系统中一

个简单的例子，其他的例子为所有种类的生产自动化，其中有产品贯穿生产工序。指导原则的一个核心概念是有机设计模式（ODP，见图7），它确定了系统的架构和特性，还可以识别这一域的不同部件和人工现象以及它们的相互关系。

系统的中心部件为机体，表示机器人和推车，它们根据给定的任务处理资源。在生产单元的情况中，每一个机体都具有几个功能，分为生产、加工和耗损功能。所以，任务成为一个起始于生产功能并终止于消耗功能的功能序列。此外，机体知道一组能够与其相互作用的机体，并交出资源（在生产单元的情况，为工件），这已经被囊括在输入和输出关系中。引入角色的概念来定义经过系统的正确的资源流动，其意思是一个机体拥有其角色分配，以告知它从哪一个机体接受资源（先决条件/端口）、应用哪一个功能，以及然后哪一个机体交出资源（后决条件/端口）。角色建立了机体之间的联系，而且所有角色的组合形成资源流，则系统配置成为一组分配给机体的特定角色（这种情况下为机器人和推车）。关于SE过程和自组织资源流系统的建模，详见文献[30]。在本案例研究中，通过角色分配来完成自组织。在出现故障的情况中，系统计算一个新的有效角色组，它足以再次完成任务。

4.3 通过行为通道指定自-x

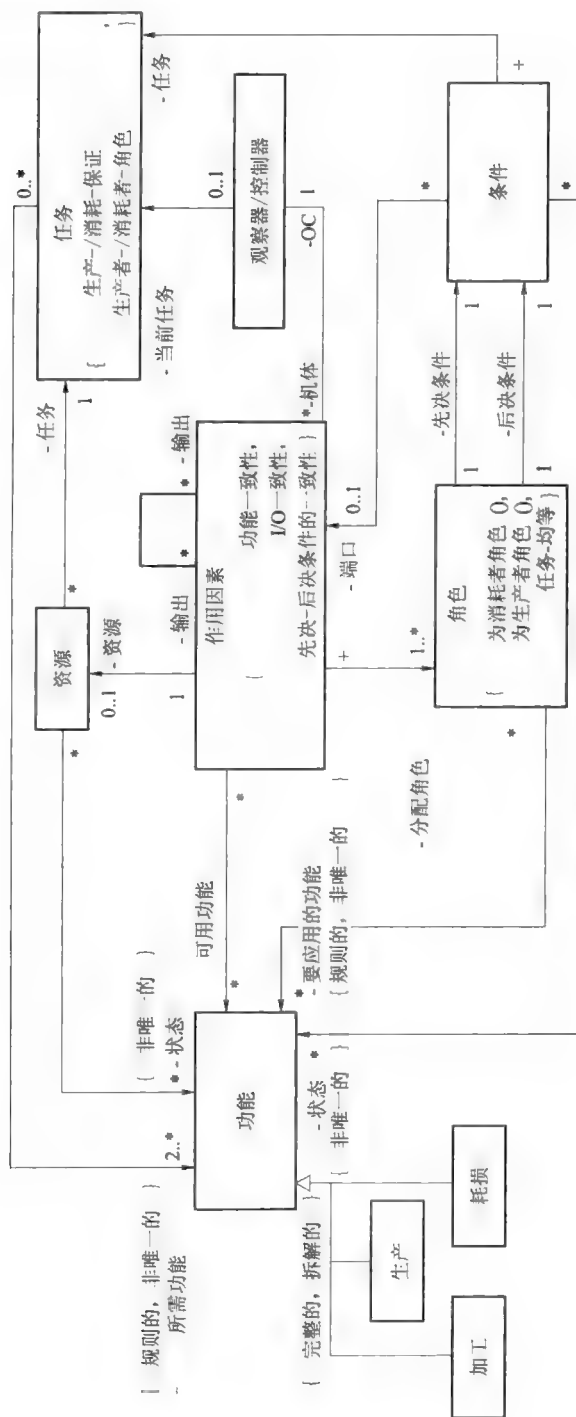
为了接受正确的行为，通过指定行为通道为机体进行角色分配，这已在3.4节提及。这可以通过OCL约束来实现，它是ODP的注释（见图7），其意思是由有机规划层计划的系统配置被限制为指定通道内的配置。这对一个正确的行为已经足够，因为执行语义被预先定义了，换句话说，它指定了角色如何被执行。所以这里的挑战是以一种方式限制分配给机器人或推车的角色，由此引起的行为使期望的系统目标得以实现——在我们的实验中对工件的正确生产以及定义任务的完成。

对机器人或推车的一致性约束的一个例子是功能一致性，在OCL中，这种约束是在机体的环境中被评估的，它是机体概念的注释，所以“自”分别指机器人和推车。

```
(self.availableCapabilities→includesAll(
    self.allocatedRoles.capabilitiesToApply))
```

功能一致性保证了机器人和推车只接受并完成它们能力范围的角色，在这种情况下，只有所需功能的角色是可用的。

另一个有趣的一致性约束是机器人或者推车的I/O一致性（称为



```
self);
    (self. inputs→includesAll(
        self. allocatedRoles. precondition. port))
and (self. outputs→includesAll(
    self. allocatedRoles. postcondition. port))
```

机体知道一对相邻的机体，它们被记录在它们的“输入”和“输出”关系中，这些关系也指明机器人和推车能够与谁交换工件。特定角色的先决和后决条件确定了工件来源于哪一个机器人或推车，也确定了工件应当交给哪一个机器人或推车。I/O 一致性表明，在实际的资源流中，机器人或推车能够识别它们所需同伴的故障，所需的同伴为角色的先决和后决条件中的端口，而且它们必须为机体的输入和输出关系的一部分。在运行期间，机器人或推车向这些临近机体发出信号，以确保它们仍然可以接受工件。

推车则以某种方式限制，该方式使其只能够进行它们所能够达到的机器人间的输运任务。所有这些约束都能够在运行期间由机体本身来监控，因为它们能够被局部地评估。通常，人们还对一个配置的定量约束感兴趣，比如分配的功能将不会超过定义的载荷，或者通量具有某一阈值。这些约束通常不被监控，因为如果发生故障，它们即被违反，这也暗示着之前已经违反了另一个监控的约束。

受约束的行为通道的更多详细说明，参见文献 [8]。

4.4 运行期间的系统行为

系统开始于一个初始计算的角色分配，如图 6 所示。将所需的应用工具分配给机器人，并为推车指定不同的路线以搬运工件。如果发生故障，比如钻孔机器人的钻头工具故障，机器人便会监测到这一功能一致性约束的违反并启动重新配置。它收集关于临近机器人和推车的信息，计算一个新的工具分配分布，重新制定推车的路线以使生产过程继续运行。而传统的系统在这种情况下则会终止，而且此时需要人工参与。重新配置后的情况如图 8 所示。

在本案例研究中，机器人和推车只具备局部的规则和相互作用功能，但由此形成的系统是一个自组织的生产单元，能够对环境变化和新的工作计划做出反应。在局部约束违反（比如，功能、输入或者输出丢失）时由机器人或推车计算得到的配置满足了由系统指定的约束，这就意味着所发生的出现被限制于第 2.1 节中描述的积极的出现。

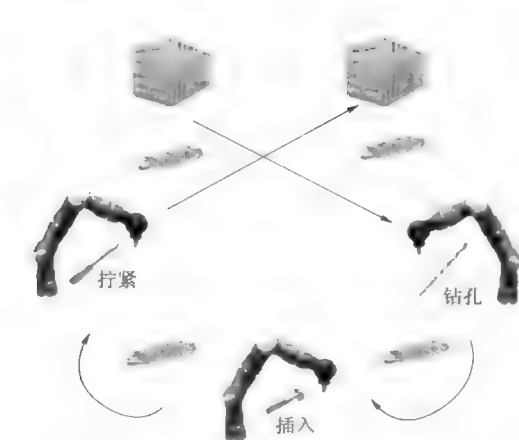


图8 重新配置后的适应性生产单元（见书后 p. 26 彩图 8）

4.5 实现自重构

有几种可能来执行自重构，当前，通过使用约束求解器为每一个机器人和推车接受有效配置来实现重构，这里使用 Kodkod^[35]。所以，实际的系统状态和 OCL 约束转变为一个表示约束满足问题（CSP）的正式模型，该模型可以从设计模式和注释约束（见 4.2 节）直接推导得到。然后该求解器尝试找到一个满足所有约束的解，并将该解传递给机体。关于转换过程和这一类系统约束求解器使用的详细内容，参见文献 [21, 22]。

与随机算法相比，集成常用技术的优点是更加容易给定行为保证，并且能够保证正确的配置。

但像遗传算法^[7]之类的启发式和随机算法也能够用来实现自重构。对于较大的问题，它们通常速度更快，而且定义合适的适应度函数使自组织得以集成，它们还将解的质量（比如载荷或者通量的平衡）考虑在内。

对于生产单元的例子，开发了一种分布式协调机制，它通过应用类似波的自组织策略^[33]来实现重构。认识到故障的机体通过询问其临近机体、看它们是否能够帮忙解决问题来开启一个自重构；如果不能，搜索向前传播至下一个机体，并依此类推。如果找到一个解决办法，机体切换至它们新的配置并继续加工。最好的情况是，只要两个机体切换它们的角色并且只有临近的推车重新配置路线。这里只需要对系统的局部部分进行重构，这在大型系统中非常具有优势。

4.6 概念证明

使用一个称为 Jadex^[27]的多机体框架执行有机层,它还能够提供通信基础。在每一个机器人和推车上运行一个有机控制层,并通过机器人编程层提供的界面进行协调。每当发生故障或者接收到另一个机体的重构请求时,它就会产生一个有机规划层机体处理重构。有不同的执行过程(见4.5节)集成在规划层的机体中,它们都可以用来重构。重构只是基于局部的知识,在成功地重构后,有机规划层会终止运行,所以在运行期间没有全局知识产生。

对于生产单元场景,我们使用 Microsoft Robotic Studio 进行了一次原型机执行,它为机器人应用提供了一个物理的模拟环境,并使得能够对开发概念进行原型机测试,文献[14]中描述的为其第一个版本。

5 结论

我们正在有机计算领域中寻找着生产自动化,尤其是适应性生产单元的领域。在下一步的机器人研究中,我们将致力于为工业机器人进行软件开发,并改进软件的质量。本文中,我们研究了如何将两个领域结合在一起,以及有机计算原理如何被用来实现一个柔性自动化系统,更精确地说,是自组织机器人单元的架构如何才能像一个架构,以及它如何被执行。

较低的层在原型上由模拟来取代,并与多机体系统内有机层的执行相耦合,就像4.6节所描述的那样。然而,这些系统能够从有机计算原理的应用中受益,尤其是在故障冗余和柔性方面。所提出的架构及其执行的主要优点是它具有牢固的基础,所以使其能够给出关于分配配置的保证,这也通常会得到对资源的正确的处理。行为通道的定义和该通道内的剩余保证使得系统更具柔性,且对系统给出坚实的保证,这对工业应用中的可接受性非常重要。然而,将自组织加入高层次的缺点是不必考虑实时的关键行为,这样只需考虑非实时的关键性重构。

不同的生产场景和出厂设置需要不同的配置机制,比如,完全的分散式结合形成或者波传播。现在我们致力于为有机规划层开发不同的插接件来通过几种重构算法的执行以增强其功能。为了满足第2节中提出的柔性需求,现在已经扩展了机器人的软件架构(见文献[12]),这种架构与机器人编程层以及机器人控制层相一致。

致谢

该工作部分地受到德国研究基金 (DFG) 优先计划 “有机计算” (SPP OC 1183) 的资助。

参考文献

- [1] Angerer, A., Hoffmann, A., Schierl, A., Vistein, M., Reif, W.: The Robotics API: An object-oriented framework for modeling industrial robotics applications. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), Taipeh, Taiwan. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2010)
- [2] Black, J. T., Musunur, L. P.: Robotic manufacturing cells. In: Nof, S. (ed.) Handbook of Industrial Robotics, ch. 35, pp. 697 – 716. John Wiley & Sons, Hoboken (1999)
- [3] Branke, J., Mnif, M., Müller-Schloer, C., Prothmann, H., Richter, U., Rochner, F., Schmeck, H.: Organic Computing-Addressing complexity by controlled selforganization. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation (ISoLA 2006), Paphos, Cyprus, pp. 185 – 191. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2006)
- [4] De Schutter, J., De Laet, T., Rutgeerts, J., Decker, W., Smits, R., Aertbeliën, E., Claes, K., Bruyninckx, H.: Constraint-based task specification and estimation for sensor-based robot systems in the presence of geometric uncertainty. Int. J. Rob. Res. 26 (5), 433 – 455 (2007), doi: <http://dx.doi.org/10.1177/027836490707809107>
- [5] Finkemeyer, B., Kröger, T., Wahl, F. M.: Executing assembly tasks specified by manipulation primitive nets. Advanced Robotics 19 (5), 591 – 611 (2005)
- [6] Ganek, A. G., Corbi, T. A.: The dawning of the autonomic computing era. IBM Systems Journal 42 (1), 5 – 18 (2003)
- [7] Goldberg, D. E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, 1st edn. Addison-Wesley Professional, Reading (1989)
- [8] Güdemann, M., Nafz, F., Ortmeier, F., Seebach, H., Reif, W.: A specification and construction paradigm for organic computing systems. In: Proceedings of the Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2008), Venice, Italy, pp. 233 – 242. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2008)
- [9] Güdemann, M., Ortmeier, F., Reif, W.: Safety and dependability analysis of self-

- adaptive systems. In: Proceedings of ISoLA 2006. IEEE CS Press, Los Alamitos (2006)
- [10] Hägele, M., Nilsson, K., Pires, J. N.: Industrial robotics. In: Siciliano, B., Khatib, O. (eds.) Springer Handbook of Robotics, ch. 42, pp. 963 – 986. Springer, Heidelberg (2008)
- [11] Hägele, M., Skordas, T., Sagert, S., Bischoff, R., Brogårdh, T., Dresselhaus, M.: Industrial robot automation. White paper, European Robotics Network (2005)
- [12] Hoffmann, A., Angerer, A., Ortmeier, F., Vistein, M., Reif, W.: Hiding real-time: A new approach for the software development of industrial robots. In: Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009), pp. 2108 – 2113. IEEE Computer Society Press, St. Louis (2009)
- [13] Hoffmann, A., Angerer, A., Schierl, A., Vistein, M., Reif, W.: Towards object-oriented software development for industrial robots. In: Proceedings of the 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2010). INSTICC Press, Funchal (2010)
- [14] Hoffmann, A., Nafz, F., Ortmeier, F., Schierl, A., Reif, W.: Prototyping plant control software with microsoft robotics studio. In: Proceedings of the Third International Workshop on “Software Development and Integration in Robotics” (SDIR-III). IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2008)
- [15] Kephart, J., Chess, D.: The vision of autonomic computing. Computer 36 (1), 41 – 50 (2003)
- [16] Mason, M.: Compliance and force control for computer-controlled manipulators. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 11 (6), 418 – 432 (1981)
- [17] Mehrabi, M., Ulsoy, A., Koren, Y., Heytler, P.: Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. Journal of Intelligent Manufacturing 13 (2), 135 – 146 (2002)
- [18] Müller-Schloer, C.: Organic computing: on the feasibility of controlled emergence. In: Proceedings of the 2nd IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, Stockholm, Sweden, pp. 2 – 5. ACM, New York (2004)
- [19] Müller-Schloer, C., Sick, B.: Controlled emergence and self-organization. In: Würtz (ed.)^[39], pp. 81 – 104.
- [20] Müller-Schloer, C., von der Malsburg, C., Würtz, R. P.: Organic computing. Informatik Spektrum 27 (4), 332 – 336 (2004)
- [21] Nafz, F., Ortmeier, F., Seebach, H., Steghöfer, J. P., Reif, W.: A generic software framework for role-based organic computing systems. In: Proc. Intl. Workshop on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, pp. 96 – 105 (2009)

- [22] Nafz, F., Ortmeier, F., Seebach, H., Steghöfer, J. - P., Reif, W.: A universal selforganization mechanism for role-based organic computing systems. In: Gonz'alez Nieto, J., Reif, W., Wang, G., Indulska, J. (eds.) ATC 2009. LNCS, vol. 5586, pp. 17 - 31. Springer, Heidelberg (2009), <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02704-8-3>
- [23] Nafz, F., Seebach, H., Steghöfer, J. P., Bäuml, S., Reif, W.: A Formal Framework for Compositional Verification of Organic Computing Systems. In: Proceedings of the seventh International Conference on Autonomic and Trusted Computing, ATC-2010 (2010)
- [24] Okamura, A., Smaby, N., Cutkosky, M.: An overview of dexterous manipulation. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2000), pp. 255 - 262. IEEE Computer Society Press, San Francisco (2000)
- [25] OMG. Object Constraint Language, OMG Available Specification (2006)
- [26] Pires, J. N.: New challenges for industrial robotic cell programming. Industrial Robot 36 (1) (2009)
- [27] Pokahr, A., Braubach, L., Lamersdorf, W.: Jadex: A bdi reasoning engine. In: Bordini, R., Dastani, M., Dix, G., Seghrouchni, A. E. F. (eds.) Multi-Agent Programming, pp. 149 - 174. Springer, Heidelberg (2005); Book chapter
- [28] Richter, U., Mnif, M., Branke, J., Müller-Schloer, C., Schmeck, H.: Towards a generic observer/controller architecture for organic computing. In: GI Jahrestagung, vol. (1), pp. 112 - 119 (2006)
- [29] Schild, K., Bussmann, S.: Self-organization in manufacturing operations. Commun. ACM 50 (12), 74 - 79 (2007), <http://doi.acm.org/10.1145/1323688.1323698>
- [30] Seebach, H., Nafz, F., Steghöfer, J. P., Reif, W.: A software engineering guideline for self-organizing resource-flow systems. In: Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2010), Budapest, Hungary. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2010)
- [31] Seebach, H., Ortmeier, F., Reif, W.: Design and construction of organic computing systems. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007), Singapore, pp. 4215 - 4221. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2007)
- [32] Smits, R., De Laet, T., Claes, K., Bruyninckx, H., De Schutter, J.: iTASC: A tool for multi-sensor integration in robot manipulation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI 2008), Seoul, Korea, pp. 426 - 433. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2008)

- [33] Sudeikat, J. , Steghöfer, J. P. , Seebach, H. , Renz, W. , Preisler, T. , Salchow, P. , Reif, W. : Design and simulation of a wave-like self-organization strategy for resource-flow systems. In: 4th International Workshop on Multi-Agent Systems and Simulation (MAS&S) (2010) (accepted)
- [34] Thomas, U. , Finkemeyer, B. , Kröger, T. , Wahl, F. M. : Error-tolerant execution of complex robot tasks based on skill primitives. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2003) , Taipei, Taiwan, pp. 3069 – 3075. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2003)
- [35] Torlak, E. , Jackson, D. : Kodkod: A relational model finder. In: Grumberg, O. , Huth, M. (eds.) TACAS 2007. LNCS, vol. 4424, pp. 632 – 647. Springer, Heidelberg (2007) , http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71209-1_49
- [36] Tsang, E. : Foundations of constraint satisfaction (1993)
- [37] Vesely, W. E. , Goldberg, F. F. , Roberts, N. H. , Haasl, D. F. : Fault Tree Handbook. U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1981)
- [38] Vistein, M. , Angerer, A. , Hoffmann, A. , Schierl, A. , Reif, W. : Interfacing industrial robots using realtime primitives. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Automation and Logistics (ICAL 2010) , Hong Kong, China. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2010)
- [39] Würtz, R. P. (ed.) : Organic Computing (Understanding Complex Systems). Springer, Heidelberg (2008)
- [40] Zaeh, M. , Ostgathe, M. : A multi-agent-supported, product-based production control. In: Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Control and Automation, Christchurch, New Zealand, pp. 2376 – 2383. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2009)



投稿邮箱: xueshu@bitpress.com.cn

咨询电话: (010) 68911947 68911085

仿生自组织 机器人系统

Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems

ISBN 978-7-5640-8970-2



定价: 88.00元

[General Information]

书名=仿生自组织机器人系统=BI O-I NSPI RED SELF-ORGANI ZI NG
ROBOTI CSYSTEMS

页数=271

SS号=13585717